LES FOURS ÉLECTRIQUES

DE LABORATOIRE

DU MÊME AUTEUR

(A LA MÊME LIBRAIRIE)

Les fours électriques industriels et les fabrications électrothermiques. — In-8° de VIII-652 pages, avec 250 figures et 40 planches.. **40 fr**

Types généraux de fours électriques industriels. Installations. Conduite des appareils. Électrodes. Métaux. Métallurgie électrothermique du zinc. Électrométallurgie de l'aluminium. Fontes et aciers électrothermiques. Alliages et composés métalliques. Alliages ferro-métalliques. Carborundum et produits dérivés. Produits nitrés synthétiques. Produits électrothermiques à base d'oxydes. Produits divers obtenus au four électrique.

Les industries électrochimiques. — Fabrication électrochimique des métalloïdes et de leurs composés. — Chlore, alcalis et composés du chlore. — Ozone. — Métaux alcalins et alcalino-terreux, métaux usuels, cuivre et nickel, métaux rares ou destinés à des usages spéciaux. — Composés organiques. — In-8° de 800 pages, avec 332 figures..... **25 fr.**

Le carbone et son industrie. — Propriétés générales des carbones. — Diamant : gisements, applications. — Mode de formation dans la nature et essais de reproduction. — Graphite et charbons électriques. — Carbones amorphes : charbon de bois, noirs industriels, coke, charbon de cornue. — La houille et ses différentes variétés. — Tourbe : utilisation industrielle. — Lignite. — In-8° de 760 pages, avec 129 figures et une planche hors texte..... **25 fr.**

La fabrication électrochimique de l'acide nitrique et des composés nitrés à l'aide des éléments de l'air. — Importance industrielle et économique des matières azotées. — Considérations sur le rôle économique de l'électricité dans la préparation électrochimique de l'acide nitrique. — Description des procédés actuels utilisés dans cette fabrication. — Applications des nitrates électrochimiques. — Cyanamide calcique. — Nitrières à haut rendement. — In-8° de 115 pages, avec 52 figures (*2e édition*).... **4 fr. 50**

Les métaux spéciaux et leurs composés métallurgiques industriels. — Manganèse, chrome, silicium, tungstène, molybdène, vanadium. — Production industrielle et électrométallurgique, utilisation. — Alliages de ces métaux avec les métaux usuels, rares et spéciaux. — In-8° de 600 pages, avec 200 figures..... **18 fr.**

Les pierres précieuses. — Propriétés caractéristiques et procédés de détermination. — Description des gemmes alumineuses, silicatées, etc. — État naturel, exploitation. — Production artificielle. — Utilisation. — Lois et règlements. — Bibliographie. — In-4° de 500 pages, avec 300 figures et 24 planches hors texte dont 8 en couleurs ..... **30 fr.**

L'aluminium dans l'industrie. — Procédés de fabrication. — Propriétés de l'aluminium. — Applications industrielles. — Bronzes, laitons et maillechorts à l'aluminium. — Alliages de l'aluminium avec les métaux usuels. — Alliages de l'aluminium avec les métaux rares ou spéciaux. — Alliages divers d'aluminium. — In-8° de VII-272 pages, avec 81 figures..... **12 fr.**

Ces prix sont provisoirement susceptibles d'une majoration dont le taux est indiqué par mon catalogue et rappelé sur un papillon figurant au verso de la couverture de chaque volume.

JEAN ESCARD
INGÉNIEUR CIVIL
LAURÉAT DE L'INSTITUT ET DE LA SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT
POUR L'INDUSTRIE NATIONALE

LES FOURS ÉLECTRIQUES DE LABORATOIRE

Analyses et Incinérations — Fusions et Volatilisations
Essais et Recherches Chimiques, Métallurgiques et Céramiques
Trempe et Traitements divers des Métaux et Alliages

DEUXIÈME ÉDITION

PARIS
DUNOD, Éditeur
Successeur de H. DUNOD et E. PINAT
47 et 49, Quai des Grands-Augustins

1920

Tous droits de reproduction, traduction et adaptation réservés pour tous pays, y compris la Russie.

865

INSTITUTE OF SCIENCE
LIBRARY
BANGALORE.

AVANT-PROPOS

Les fours électriques présentent sur les appareils de chauffage généralement employés dans les laboratoires (fours à gaz, grilles, fours à moufle, brûleurs, etc.) le double avantage d'une manipulation plus simple et l'obtention aisée de températures très élevées. Cependant, pour être d'un emploi réellement pratique et économique, ils doivent posséder les qualités suivantes :

a) Donner des températures très élevées et permettre d'obtenir ces dernières rapidement ;

b) Permettre d'élever ou d'abaisser graduellement la température, depuis les températures les plus basses jusqu'aux plus élevées (fusions et volatilisations) ;

c) Être composés de matériaux réfractaires, robustes, non conducteurs et sans action chimique sur les produits traités dans le four ;

d) Permettre de produire des réactions quelconques, soit à l'air, soit en atmosphère neutre ou réductrice, soit dans un gaz quelconque, sous pression ou dans le vide ;

e) Produire une température uniforme dans un espace déterminé ;

f) Avoir une forme pratique et pouvoir se brancher sur les canalisations électriques existantes ;

g) Permettre à l'opérateur d'examiner les fusions ou réactions en cours sans qu'il soit obligé d'arrêter la marche de l'appareil ;

h) Avoir un rendement thermique élevé, la différence de température entre le corps chauffant et le corps chauffé devant être réduite au minimum.

Aucune substance ne possédant toutes ces qualités réunies, c'est par l'association de matériaux de nature différente qu'on peut satisfaire ces divers desiderata. D'autre part, les opérations de laboratoire (analyses, fusions, incinérations, réactions quelconques) étant très variées, les dispositifs employés peuvent eux-mêmes affecter des agencements différents. De là les nombreuses formes adoptées et les multiples combinaisons réalisées en vue d'obtenir le résultat poursuivi. Nous classerons comme suit les divers fours électriques pouvant être utilisés dans les laboratoires de recherches scientifiques ou industrielles :

1° Fours à lames ou fils métalliques résistants (nickel, platine) entourant des tubes réfractaires ;

2° Fours à arc ;

3° Fours à arc et résistance ;

4° Fours à résistance ;

5° Fours à bain de sels fondus ;

6° Fours à induction.

Suivant le modèle choisi et l'intensité de courant, on peut obtenir des températures oscillant entre 800 et 2.500° environ. Avec les fours à fils résistants, on dépasse difficilement 1.500°. Les fours à arc permettent d'atteindre facilement 2.500°. Les fours à résistance donnent de 1.500° à 2.000°. c'est-à-dire conviennent particulièrement bien aux recherches métallurgiques.

LES FOURS ÉLECTRIQUES
DE LABORATOIRE

CHAPITRE PREMIER

MATÉRIAUX DES FOURS

Produits réfractaires et isolants. — Qu'il s'agisse de fours à fils résistants ou de fours à arc, à résistance ou à induction, tout appareil électrothermique comprend essentiellement les éléments suivants : la *chambre de chauffe* proprement dite (cylindre ou creuset) ; les *substances chauffantes* (fils résistants, charbons pour l'arc électrique, grenaille, corps semi-conducteurs, électrodes) ; le *revêtement réfractaire*, destiné à isoler de l'extérieur la chambre de chauffe ; l'*enveloppe*, qui protège mécaniquement les différents organes précédents. La principale difficulté, pour la confection des appareils, est de trouver des matériaux à la fois *réfractaires et isolants* pouvant assurer une durée de service la plus longue possible. Les substances qui donnent les meilleurs résultats à ce point de vue sont la magnésie, la chaux et le carbonate de chaux, la dolomie, le quartz fondu, l'amiante, certains carbures et azotures (azoture de bore, silundum, siloxicon), l'alundum (alumine artificielle).

La *chaux* est un excellent produit réfractaire et isolant, mais elle présente l'inconvénient, à des températures élevées, de se fendiller. Il est de plus assez difficile d'obtenir de gros blocs de chaux homogènes et non gercés. Aussi la remplace-t-on souvent par son carbonate. Ce dernier a l'avantage de pouvoir être obtenu en blocs aussi gros qu'on le désire, d'être d'une grande solidité, de se laisser tailler facilement et de permettre ainsi de faire au laboratoire même

toutes les modifications de forme que l'on désire. La pierre de Coursan convient bien à cet usage, notamment pour la fabrication des fours à arc. Cependant, elle finit par se décomposer et la chaux produite par la chaleur de l'arc fond, se volatilise et gêne les opérations. On y remédie en donnant de plus grandes dimensions à la cavité centrale du four et en recouvrant ses parois de couches alternées de *charbon* et de *magnésie* de 1 centimètre d'épaisseur. La magnésie est, en effet, irréductible par le charbon et ne peut disparaître que par volatilisation.

L'*alundum* est de l'alumine fondue électriquement. On l'obtient industriellement par la fusion électrothermique de la bauxite. C'est un produit blanc, fusible seulement vers 2.000 ou 2.100°, inattaquable aux acides et aux alcalis, très résistant aux efforts mécaniques et trois fois environ plus conducteur de la chaleur que la porcelaine. Il est donc tout indiqué pour la fabrication des tubes-supports des fils pour fours à métaux réfractaires et aussi pour les revêtements extérieurs.

L'*azoture de bore* a été employé avec succès dans les fours destinés aux opérations de fusion des métaux très réfractaires tels que le tungstène, le molybdène, le titane, car il est infusible et non dissociable même aux plus hautes températures de l'arc électrique. Il n'a pas d'affinité chimique visible, constitue un excellent calorifuge et possède une grande résistivité même à une température très élevée. C'est, en effet, un isolant électrique parfait : à 1.200°, sous une épaisseur de 3 millimètres, une différence de potentiel de 500 volts ne donne pas trace d'un courant mesurable. Il est donc tout indiqué pour constituer des fours à agglutiner les substances les plus réfractaires. On l'a utilisé avec succès pour la fusion et l'agglomération du carbure de bore, du tungstène et du bore, ce dernier élément ne fondant qu'à 2.300°. Aussi le four électrique à azoture de bore est-il devenu un auxiliaire important des laboratoires industriels.

La *chromite*, qui est un oxyde de fer et de chrome naturel, donne de très bons résultats ; elle est très réfractaire et présente de plus l'avantage de résister aux variations brusques de température qui se produisent dans les fours à marche intermittente.

Le *siloxicon*, substance dérivée du carborundum et à laquelle on attribue la formule SiCO, est également très réfractaire et, de plus,

possède une plasticité élevée ; il est inattaquable par la plupart des réactifs fondus et peu se mouler avec ou sans agglomérant. On l'emploie dans la confection des fours combinés à arc et à résistance.

Le *quartz fondu* est utilisé pour former la paroi extérieure de la chambre de chauffe dans certains fours à réactions gazeuses; on en fait aussi des fenêtres permettant de suivre les réactions qui s'effectuent dans les fours. Ce corps, en plus de sa transparence, possède en effet la propriété d'être réfractaire (il fond vers 1.700°) et isolant.

Les autres substances isolantes employées dans ces appareils sont le *sable*, la bourre d'*amianle* et la *porcelaine*.

Creusets. — Les *creusels* sont généralement en graphite. On les fabrique par moulage et cuisson à haute température d'une pâte composée de graphite naturel, d'argile et de goudron ; ce dernier facilite l'adhérence mutuelle des particules de graphite et d'argile et diminue ainsi les chances de formation de fentes ; le mélange doit être très pur et, en outre, renfermer le moins possible de cendres. On fabrique aussi des creusets en les taillant directement dans des blocs de graphite artificiel (charbons électro-graphitiques) analogues à ceux utilisés comme électrodes dans les opérations électrothermiques. Il est ainsi facile de leur donner une forme quelconque.

Mais en vue de concentrer la chaleur en un point déterminé du creuset, on peut le former d'éléments inégalement résistants. On arrive à ce résultat, soit en diminuant sa section sur une surface périphérique donnée *mn* (*fig.* 1), soit en modifiant la conductibilité du mélange initial en faisant varier les pourcentages de graphite et d'argile ; les extrémités *a* et *b* (*fig.* 2) renferment plus de graphite que la partie médiane *c* qui doit être plus résistante. Ces dispositions conviennent aux creusets dans lesquels le courant arrive par la partie supérieure et la base. Les parties *mn* et *c* sont ainsi seules portées à une très haute température pendant le passage du courant.

On peut remplacer les creusets de charbon par des creusets en *magnésie* dans les opérations où toute carburation doit être évitée, mais il faut avoir soin de purifier préalablement la magnésie de toutes les substances capables d'abaisser son point de fusion. Dans ce but on prend de l'hydrocarbonate de magnésie qu'on calcine

pendant plusieurs heures. La magnésie obtenue est pulvérisée, puis digérée par une solution étendue de carbonate d'ammoniaque. On lave à grande eau et on calcine à haute température. La magnésie ainsi préparée, pour pouvoir être moulée, est délayée dans un peu

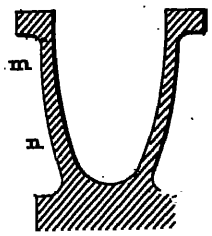


FIG. 1. — Creuset en graphite avec zone (*mn*) de résistance électrique maximum.

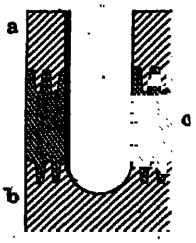


FIG. 2. — Creuset en charbon avec zone (*c*) de résistance maximum.

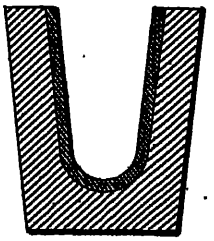


FIG. 3. — Creuset en graphite avec revêtement intérieur en magnésie.

d'eau de manière à former une pâte épaisse qu'on moule par compression puis qu'on abandonne à une dessiccation lente et qu'on cuit une dernière fois. Cette substance, fortement comprimée, est très dure et ne présente pas de retrait à haute température. On l'utilise pour la fabrication des creusets en magnésie pure et aussi pour le revêtement intérieur des creusets de charbon (*fig.* 3) ou des tubes de graphite.

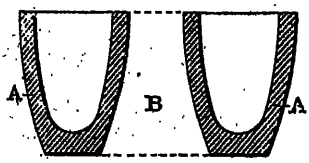


FIG. 4. — Creuset annulaire. (A, parois; B, partie vide centrale).

En vue d'augmenter la capacité des creusets sans accroître l'épaisseur des parois (ce qui rendrait le chauffage difficile), on emploie aussi la forme *annulaire* (*fig.* 4). De cette façon on n'est pas obligé d'avoir des creusets à forme haute, et la disposition adoptée se prête très bien au chauffage électrique par résistance.

Pour la fusion du quartz pur, Billon-Daguerre emploie des creusets en graphite et carborundum formés de deux compartiments. Il en sera question plus loin (V. *fig.* 27 à 29).

M. Chouriguine prépare les creusets de magnésie par le procédé suivant :

On part d'un mélange de magnésie crue et de magnésie pure en poudre fine. Après avoir concassé et pulvérisé la magnésie crue, on prend deux parties de cette poudre, agglomérée avec un peu d'eau, et une partie de magnésie calcinée pure, de façon à obtenir une masse peu humide qu'on soumet ensuite au moulage. Pour cette opération, on se sert d'un moule très simple en laiton, constitué par un cylindre creux destiné à donner au creuset sa forme extérieure (un pilon formant la partie intérieure), et un fond en acier. On remplit le cylindre de cuivre avec de la magnésie, on la presse fortement, d'abord avec les doigts, puis à l'aide du pilon qu'on place concentriquement au cylindre et qu'on frappe avec un marteau. On retire ensuite le pilon en le tournant et on détache le creuset de magnésie en frappant légèrement sur le fond du moule. Finalement, le creuset est introduit dans un four à moufle et chauffé pendant plusieurs heures.

Le *tungstène* et la *fonte de tungstène* ont été aussi récemment proposés et utilisés pour la fabrication des tubes chauffants et creusets des fours de laboratoire, tant à cause de leur faible chaleur spécifique que de leur possibilité de supporter de très hautes températures. A ce dernier point de vue, le charbon peut donner, entre électrodes, une température plus élevée, mais il présente le double inconvénient de carburer les métaux traités et de se transformer en graphite. En outre, un calcul fort simple démontre que, pour un tube de dimensions données, la dépense d'énergie, avec un tube de tungstène, n'est que les $65/100^{es}$ environ de ce qu'elle est avec un tube de charbon.

Pour la fabrication des tubes et creusets en tungstène ou fonte de ce métal, on emploie généralement le procédé suivant :

On comprime dans un moule le mélange de poudre de tungstène et d'un métal ou alliage volatilisable et on lui donne la forme qu'il doit avoir lors de son emploi. On le chauffe dans le vide de façon à supprimer les gaz occlus, puis on le place dans la matière métallique fondue qui pénètre, pour ainsi dire, par imbibition dans la masse semi-poreuse de tungstène et la rend homogène. En chauffant à nouveau à l'aide d'un fort courant électrique, le tunsgtène subsiste seul et possède l'homogénéité et la résistance mécanique nécessaires.

Résistances de chauffe. — Les corps jouant le rôle de *résistance* à l'état de fil ou de grains sont surtout le platine, l'iridium, le nickel, le chrome, le tungstène, le nickelo-chrome et le graphite.

Dans les fours où la transformation d'énergie électrique en énergie calorifique s'effectue entre le circuit extérieur et la chambre de chauffe à l'aide de semi-conducteurs, on emploie souvent le *charbon*. Ce corps peut être utilisé seul à l'état de grains ou en mélange avec des métaux, du sable, du carborundum. On obtient ainsi des conductibilités variées.

Le *kryptol* est un mélange de ce genre qu'on emploie sous forme de grains plus ou moins volumineux, de poudre, de baguettes ou de plaques. Il se compose d'un mélange de corps conducteurs de première et deuxième classes. Comme élément conducteur de première classe on y rencontre du charbon ou, pour mieux dire, du graphite, lequel a été nécessairement soumis, au préalable, à un traitement particulier. Parmi les éléments conducteurs de deuxième classe, il faut citer la terre argileuse et des silicates, en un mot de l'argile à laquelle on ajoute du carborundum.

Les effets obtenus sont les suivants : si l'on insère dans le circuit un mélange de corps conducteurs de première et de deuxième classes, le conducteur de première classe, pourvu qu'il se trouve en quantité suffisante, laisse passer le courant et donne en même temps de la chaleur au corps conducteur de deuxième classe ; puis ce dernier, une fois qu'il est suffisamment échauffé, participe à la conduction du courant. Le kryptol, au fur et à mesure qu'il s'échauffe, prend une résistance moindre ; c'est là une propriété avantageuse, particulièrement quand il s'agit de faire fonctionner le four électrique, car, pour ménager les matériaux qui entrent dans la composition de ce four, on peut alors le chauffer progressivement, c'est-à-dire commencer par un courant faible, en diminuant peu à peu les résistances du rhéostat.

Comme les éléments constitutifs du kryptol, le charbon ou le graphite, peuvent être portés à une température très élevée sans se désagréger, et comme le point de fusion des substances additionnelles est également très élevé, on a la possibilité d'obtenir des températures considérables. Le kryptol se présente sous forme de granules noirs à éclat métallique plus ou moins accentué.

La manière d'opérer, avec les systèmes de chauffage au kryptol, est très simple. Si l'on relie, par une mince couche de granules de kryptol, deux électrodes de charbon disposées sur une plaque en briques réfractaires ou en fer émaillé, cette couche devient conductrice du courant dès qu'on fait communiquer les électrodes avec une source d'énergie et elle est portée au rouge sous l'action d'une intensité suffisamment élevée ; la chaleur produite se communique alors à la plaque en briques réfractaires ou au fer. Le réglage de la température ou de l'intensité du courant s'opère simplement et rapidement, sans qu'on ait à utiliser des résistances absorbant l'énergie : il suffit d'ajouter ou d'enlever du kryptol. On peut encore régler le courant en comprimant ou en éparpillant quelque peu la masse de kryptol employée.

CHAPITRE II

FOURS A LAMES OU FILS RÉSISTANTS

Fils de platine et de nickel. — Il est facile de construire un four électrique en enroulant simplement une lame ou un fil de *platine* autour d'un tube en matière réfractaire et en portant le métal à la température du rouge blanc par le passage d'un courant (fours G. Charpy). On obtient ainsi aisément, dans l'intérieur du tube, une température pouvant atteindre 1.400 à 1.500°. De nombreux dispositifs ont été employés ou proposés pour arriver au maximum de rendement calorifique ; les formes de fours sont variées et, pour la confection des résistances, on peut utiliser des métaux autres que le platine.

C'est ainsi que pour les appareils ne devant pas donner plus de 800 à 1.100°, on adopte le fil de *nickel* pur. Ce métal fond à 1.480° environ, mais il présente l'inconvénient d'absorber de l'oxygène bien avant sa fusion et il devient alors cassant.

Comme tube réfractaire, on emploie souvent le quartz fondu, qui laisse passer facilement les rayons calorifiques, ou encore la stéatite, variété de talc qu'on peut tailler et mouler aisément.

Fils en alliage nickel-chrome. — Le *nickel-chrome* est employé en fil ou ruban enroulés autour d'une chambre rectangulaire ou cylindrique en alundum. Il possède une résistivité près de dix fois supérieure à celle du platine et 60 fois supérieure à celle du cuivre. Il est à peine oxydable même à des températures très élevées, se dilate peu et ne se déforme pas sensiblement à haute température. L'alliage le plus employé à cet usage contient :

Nickel	80 à 95 %
Chrome	20 à 5

Un four modérément conduit et fait de cette matière peut fonctionner environ 1.000 heures sans réparation et donner 1.100° de température maximum.

La figure 5 représente un petit four ainsi établi. Il comprend un creuset de fusion A en alundum, cannelé sur sa surface extérieure de façon à loger dans ses rainures le fil résistant *ab* relié au circuit extérieur. Autour du creuset se trouve un isolant électrique et calorifuge M (bourre d'amiante) renfermé dans un récipient E. Ce four peut fondre 200 grammes d'aluminium en dix minutes et s'adapte à toute prise de courant d'un circuit à 110 volts ; l'intensité absorbée est de trois à quatre ampères. L'appareil se ferme à sa partie supérieure par un bouchon B en terre réfractaire.

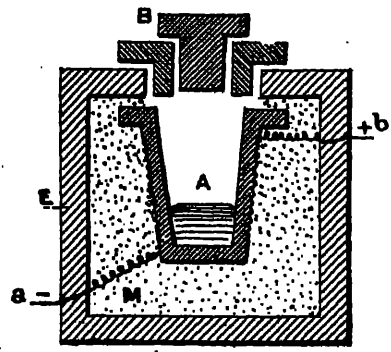


FIG. 5. — Four à fil d'alliage nickel-chrome.

Au lieu de creusets verticaux, on peut utiliser des fours horizontaux ayant l'aspect extérieur de ceux à lame de platine (*fig.* 6) et destinés surtout aux essais de fusion et traitement thermique des métaux et alliages. Nous donnerons la description de celui utilisé par Yatsevitch pour l'établissement des courbes d'échauffement et de refroidissement des aciers spéciaux. Le four comprend un tube central ayant 35 millimètres de diamètre intérieur, 45 millimètres de diamètre extérieur, 30 centimètres de longueur ; ce tube porte un fil de nickel-chrome enroulé de façon à donner 4,5 tours par centimètre de longueur. L'enroulement est recouvert d'une couche mince de ciment d'alundum isolée elle-même par un revêtement d'amiante semblable à celui dont on recouvre les tuyaux de vapeur à haute pression. Enfin ce revêtement est entouré d'une double couche de feutre d'amiante maintenue par un fil de fer de faible diamètre. Les extrémités du four consistent en deux têtes de fonte de forme spéciale, percées de quatre trous dans lesquels passent des boulons maintenant tout l'appareil. Chacune de ces têtes est en outre percée

d'un trou central destiné au passage du tube d'alundum et est disposée de façon à permettre l'installation de connexions isolées. Les pieds en fer du four sont fixés à deux traverses parallèles en bois pouvant se déplacer facilement entre deux guides cloués à une large planche ; il est ainsi possible de changer rapidement la position de l'appareil le long de l'axe du tube. Le courant employé pour chauffer le four est de 110 volts ; afin de régulariser la vitesse d'échauffement, un rhéostat-bloc en carbone et un ampèremètre sont placés dans le circuit, en série avec le four.

Pour relever, à l'aide de cet appareil, les températures d'échauffement et de refroidissement, l'éprouvette, le corps neutre et leurs couples thermo-électriques ne sont pas placés directement dans le tube d'alundum, mais à l'intérieur d'un long tube de porcelaine ou de silice (45 centimètres) ayant 18 et 28 millimètres de diamètres intérieur et extérieur (1) ; ce tube est fortement assujetti au moyen d'un support de laboratoire, de façon à maintenir entre deux tubes, lorsque le four est disposé pour la chauffe, un espace annulaire permettant au four de se déplacer le long de ses guides sans changer la position du tube intérieur. On peut ainsi déterminer très exactement la cause des phénomènes thermiques qui se passent dans la pratique. La disposition même de l'appareil permet du reste de réaliser trois vitesses différentes de refroidissement : soit en laissant refroidir le tube intérieur avec le four, soit en enlevant le four et en laissant le tube se refroidir à l'air, soit enfin en enlevant le four et en soumettant le tube à l'action d'un courant d'air fourni par un ventilateur.

Fils et tubes d'iridium. — L'*iridium* permet d'atteindre des températures plus élevées que le platine ; mais c'est surtout sous forme de tubes que ce métal est utilisé, constituant ainsi de véritables fours à résistance (V. p. 67). Certains alliages complexes de fer, nickel, calcium et aluminium, les fils de tungstène et de molybdène donnent aussi de bons résultats.

Lames de charbon. — Il faut également signaler le *charbon*, utilisé sous forme de spirales dont on enveloppe des tubes en por-

(1) Les tubes de silice sont préférables à ceux de porcelaine qui se brisent parfois après un certain nombre d'expériences.

celaine de magnésie pure. Ces spirales sont obtenues par découpage de la matière dans des cylindres de charbon de cornue ou de graphite. Avec un courant à 110 volts ramené à 15 volts à l'aide d'un transformateur, on peut porter le tube à 2.500° environ. Pour éviter l'action de l'air qui le brûlerait rapidement, on noie les spires de charbon dans une poussière isolante protégée elle-même par une enceinte en terre réfractaire.

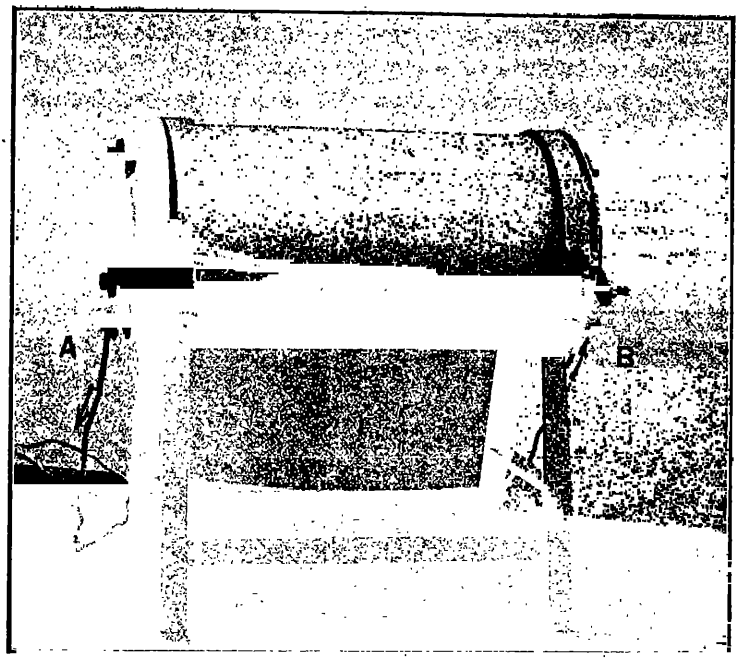


FIG. 6. — Four électrique horizontal à lame de platine, système Poulenc.
A, B, prises de courant et extrémités du fil du circuit d'alimentation.

Mailles métalliques. — Au lieu de fils et de lames, on peut utiliser un réseau de mailles serrées de fils métalliques, en platine par exemple, fixés à la paroi du tube de chauffe par une glaçure. Les appareils construits de cette façon sont plus robustes que les précédents, mais ne permettent pas de dépasser 1.200°.

Lames de platine. — L'avantage des lames sur les fils est qu'elles peuvent se fixer plus facilement sur la surface du tube de chauffe et supprimer ainsi les déperditions de chaleur. L'enroulement est fait de façon que les spires soient séparées de quelques millimètres seulement, pour que la surface chauffante soit presque entièrement recouverte. Il existe un grand nombre de modèles, les tubes pouvant occuper la position horizontale ou verticale, et être fermés ou non à leurs extrémités. Dans certains fours, les feuilles de platine ont 13 à 15 millimètres de largeur et $0^{mm},007$ seulement d'épaisseur. Le diamètre des tubes varie entre 20 et 75 millimètres environ et leur longueur entre 15 et 60 centimètres. Nous donnons ci-dessous quelques chiffres se rapportant à des fours à tubes cylindriques :

DIMENSIONS DU TUBE DE CHAUFFE		PARTIE RECOUVERTE PAR LA SPIRALE DE PLATINE	DÉPENSE D'ÉNERGIE	TEMPÉRATURE OBTENUE
Diamètre	Longueur			
20mm	60cm	45cm	2.200 watts	1.500°
30	40	40	2.800 —	1.450
50	60	60	4.500 —	1.400
65	30	30	2.800 —	1.400

Les figures 6 à 10 concernent des fours à lame ou fil de platine pour analyses.

Les températures sont faciles à évaluer à l'aide de couples thermo-électriques renfermés dans des tubes réfractaires et qu'il suffit d'introduire dans le four à un moment quelconque. A l'aide d'un galvanomètre (*fig.* 7) et d'une table de concordance, on obtient immédiatement la température.

Par l'emploi d'un rhéostat on peut modifier cette dernière dans de grandes limites. Les températures maxima ne doivent cependant pas être maintenues trop longtemps, car des accidents pourraient se produire au tube de chauffe par suite d'électrolyse et de volatilisation partielle du platine. Lorsque le four occupe la position verticale (*fig.* 9), les températures sont inférieures de 100° environ dans le tube, par suite du courant d'air ascendant qui le refroidit. Le

four doit être mis en route lentement à l'aide du rhéostat, afin de réaliser un chauffage progressif ; cela évite les ruptures par dilatations subites et inégales du tube de chauffage.

En général, les divers appareils de manœuvre et de mesure sont placés sur un tableau de distribution analogue à ceux employés pour l'éclairage, ce qui simplifie les manipulations.

Pour éviter les pertes de chaleur à l'extérieur des fours, on les recouvre souvent de plusieurs enveloppes d'amiante ; une armature de fonte sert d'enveloppe extérieure. Pour l'entrée et la sortie du courant, on peut employer deux gros fils de ferro-nickel reliés directement aux lames ou fils de platine.

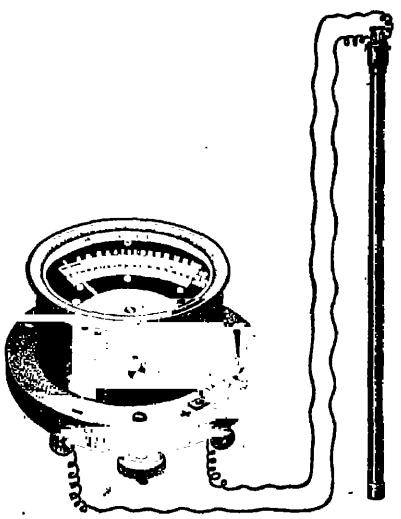


FIG. 7. — Pyromètre et galvanomètre pour la mesure des températures à l'intérieur des fours.

Les fils de cuivre s'oxydent en effet plus ou moins rapidement pendant le passage du courant et deviennent très fragiles. Pour assurer l'isolement du platine autour du tube de chauffe, il est bon de le noyer complètement dans une couche de magnésie.

En vue de rendre la température de ces appareils indépendante des variations et pertes par conductibilité et radiation, on peut leur adjoindre un thermostat. Celui de Rosenstein et Kranendieck consiste en un réservoir contenant de l'azote et chauffé par une bobine de fil montée en dérivation entre les bornes du four. Le réservoir à azote est relié, d'autre part, à un tube capillaire dans lequel la pression du gaz fait monter et descendre une colonne de mercure, de telle sorte qu'elle ferme, dans certaines positions, le circuit d'un relais de commande du circuit électrique du four. Lorsque l'intensité du courant de chauffe varie, par suite de variations du voltage extérieur ou de la résistance intérieure du four, il se produit

une modification parallèle de la température du régulateur, qui provoque automatiquement une variation du voltage du courant alimentant le four, dans un sens tendant à corriger les changements

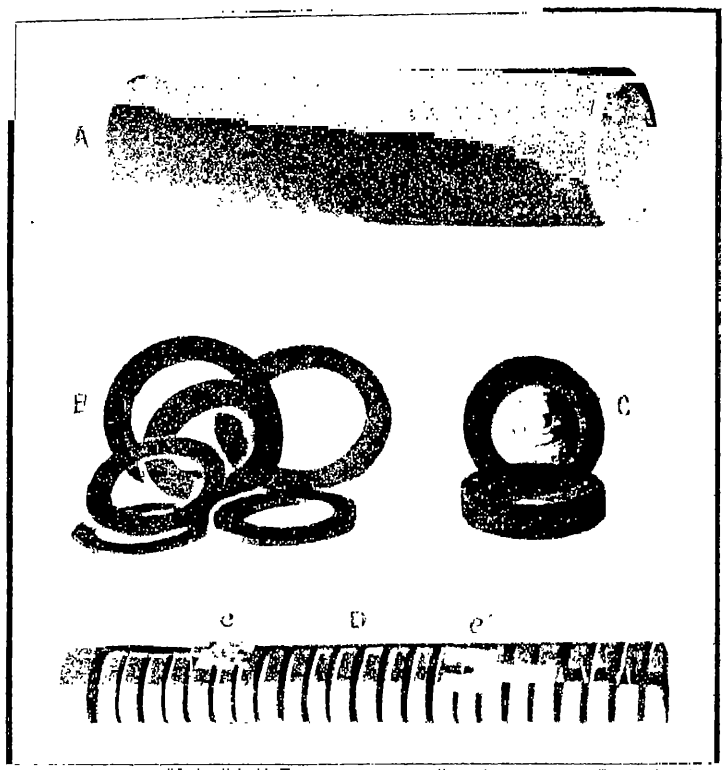


FIG. 8. — Différentes pièces d'un four électrique horizontal à lame de platine. A. tube réfractaire calorifuge protégeant le tube de chauffe D. — *e*, *e'*, extrémités de la lame de platine recouvrant le tube D et formant prises de courant. — B. rondelles d'amiante pour le serrage du tube A. — C, rondelles en terre réfractaire fixant le tube D.

de température. L'appareil est rendu, de plus, entièrement indépendant de la pression atmosphérique.

Avec ce régulateur, il est facile de maintenir, pendant plusieurs semaines consécutives, un four à une température quelconque, sans que celle-ci varie de plus de 1° dans un sens ou dans l'autre.

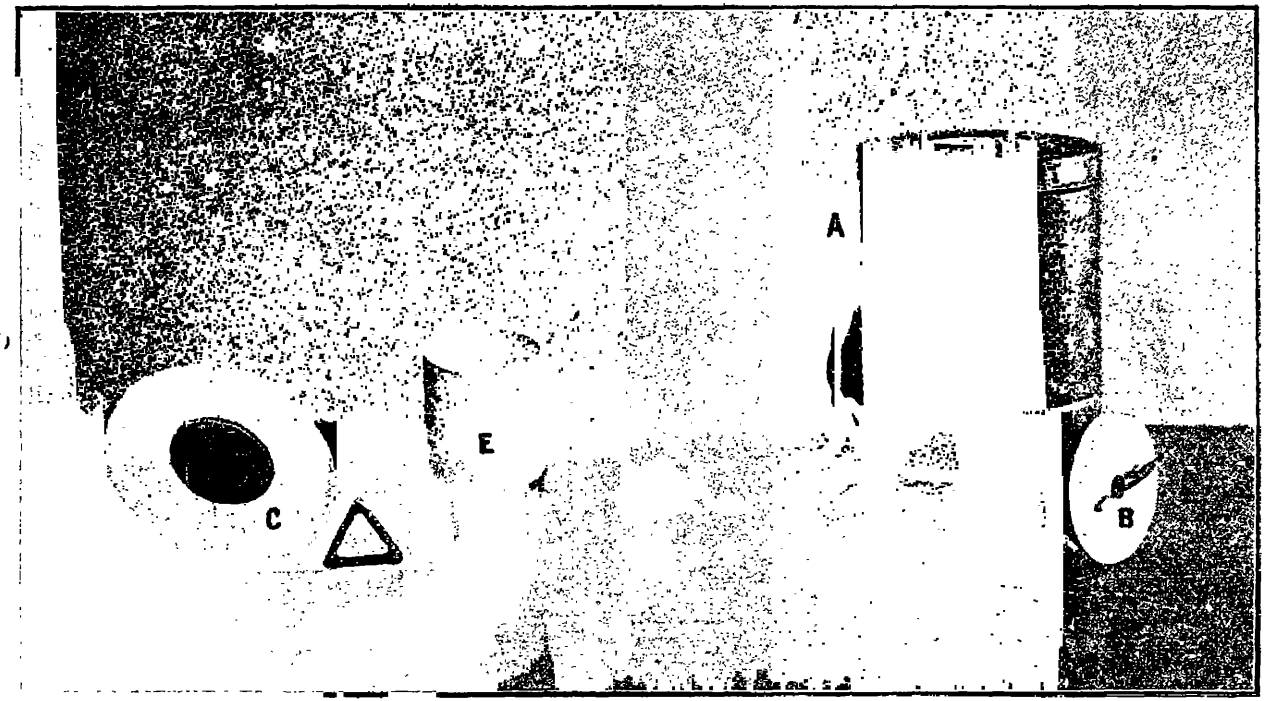
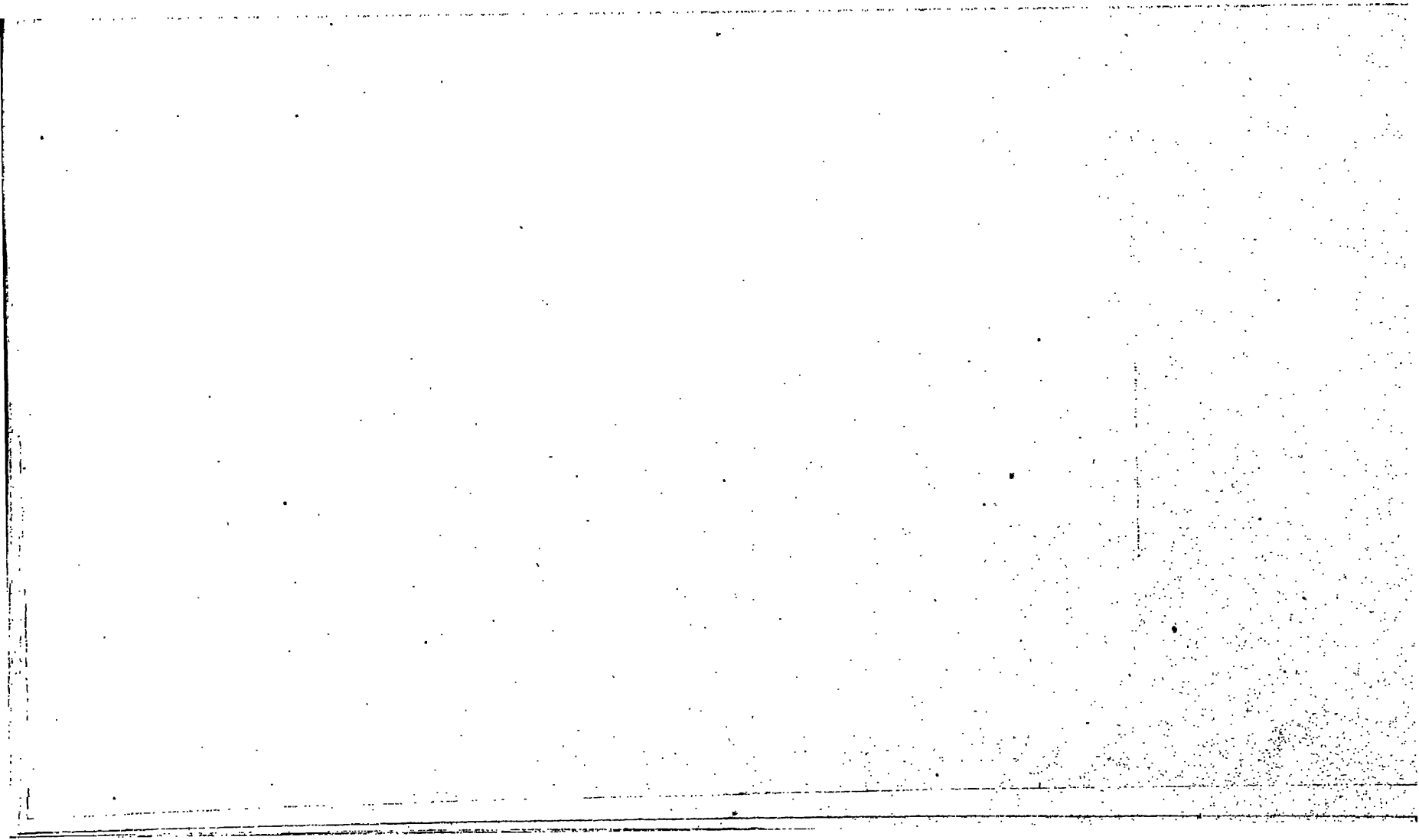


FIG. 9. — Four électrique à lame de platine et à tube vertical pour le chauffage des creusets.

A, four complet. — B, couvercle. — C, rondelle d'amiante formant calorifuge aux extrémités inférieure et supérieure du tube. — D, triangle en terre réfractaire supportant le tube. — E, tube de chauffe en terre spéciale ou alundum recevant la lame de platine.



Applications. — Ces fours ont de nombreuses applications et peuvent rendre de grands services dans les laboratoires, notamment pour les travaux de recherches et d'analyses, les essais métallurgiques, les incinérations, les travaux céramiques, les fusions d'alliages et de métaux. Leur supériorité sur les fours à gaz consiste surtout en ce qu'on peut régler la température à volonté et d'une manière précise et qu'on opère toujours dans une atmosphère connue.

Voici quels sont les principaux emplois des fours à tube et lame de platine mince, suivant leurs dimensions et la température maximum qu'ils peuvent fournir :

DIAMÈTRE DU TUBE	LONGUEUR DU TUBE	TEMPÉRATURE MAXIMUM	EMPLOI
25mm	200mm	1.350°	Étude des aciers au carbone. Étalonnage des couples. Métallographie.
30	300		
40	300		
50	300	1.150°	Essais divers, en particulier chauffage des tubes à analyse.
50	600		
60	300		
60	600		

La figure 10 donne le schéma d'un four électrique à moufle et la figure 11 la vue extérieure d'un four analogue pouvant être manœuvré à l'aide d'un rhéostat à plots. En vue de ne pas détériorer la lame de platine par un excès de courant exagéré, la paroi réfractaire qui entoure le tube chauffant est creusée d'une cavité dans laquelle vient se loger une partie de cette lame avant son entrée dans l'appareil. Comme elle est portée à peu près à la même température que le restant de la lame, on se rend compte facilement de l'état de cette dernière d'après l'aspect de la partie visible : celle-ci ne doit pas dépasser le rouge naissant.

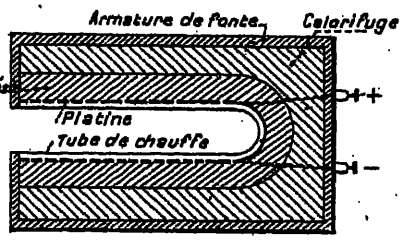


FIG. 10. — Coupe schématique d'un four électrique à moufle à lame de platine.

Dans certains fours, cet indicateur de courant, qui joue en même temps le rôle de dispositif de sûreté, consiste en un fil d'or, en forme d'arc, placé à l'extérieur de la masse du four. A la mise en marche, à l'aide du rhéostat on intercale dans le circuit la résistance voulue pour que le fil d'or devienne incandescent, ce que l'on voit à travers une feuille de mica. Puis la température s'élevant, l'intensité du courant diminue et, par suite, le fil refroidit. On met alors hors circuit la résistance voulue pour que le fil redevienne incandescent.

Au fur et à mesure que la température du four s'élève, celle du fil s'élève aussi, non seulement par le passage du courant, mais aussi parce qu'il est chauffé par le four lui-même. Pour l'amener à l'incandescence, il faut donc employer une intensité de courant d'autant plus faible que le four est plus chaud. On arrive ainsi à porter constamment le fil au rouge naissant avec l'intensité du courant nécessaire pour que le moufle soit à la température voulue.

Pour le bon fonctionnement, il suffit donc de régler l'intensité du courant jusqu'à ce que le fil témoin commence à rougir. Dans beaucoup de cas, ce dispositif supprime l'emploi d'un galvanomètre et d'un élément thermique pour le contrôle de la température du four.

Ces fours sont surtout employés dans les travaux de chimie analytique, pour les calcinations et, en général, dans toutes les analyses où il est important de maintenir une température régulière. Les incinérations peuvent être effectuées à une température relativement basse, inférieure à celle du gaz, en raison du chauffage régulier de toutes les parties du moufle. L'action des gaz réducteurs est complètement supprimée. On les emploie également pour les recherches métallurgiques, en raison de la température élevée et régulière ainsi obtenue.

Pour éviter la détérioration du moufle par l'oxyde de plomb, dans la coupellation, il suffit de placer les coupelles, comme d'habitude, sur une couche de cendre d'os. Les vapeurs peuvent être évacuées par une petite cheminée placée sur l'avant du moufle.

Ces fours sont également pratiques pour la trempe de l'acier et autres travaux analogues, en raison de leur température régulière.

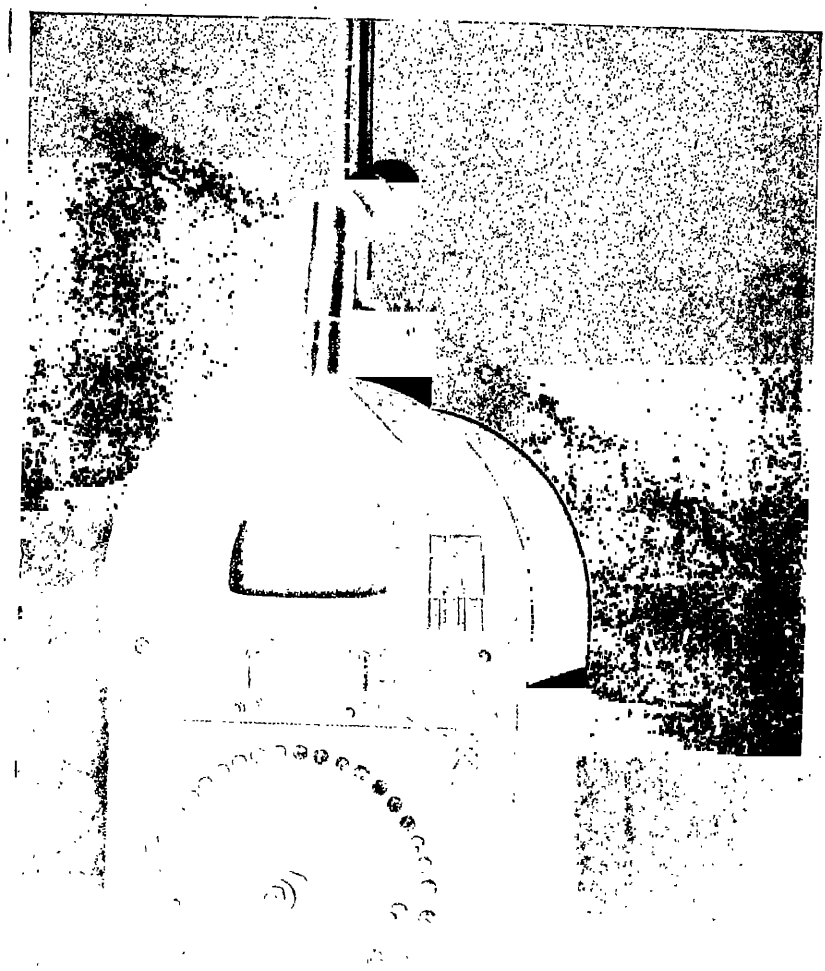


Fig. 11. — Four électrique à moufle et à lame de platine fonctionnant à l'aide d'un rhéostat à plots.

Nous donnons ci-dessous la dépense de courant de ces fours suivant leurs dimensions :

DIMENSIONS INTÉRIEURES			TENSION en VOLTS	DÉPENSE DE COURANT EN AMPÈRES POUR DES TEMPÉRATURES MAXIMA DE		
LONGUEUR	LARGEUR	HAUTEUR		800° C.	1.000° C.	1.200° C.
15cm,9	9cm	6cm,5	110	5	7	10
			220	2,5	3,5	5
22cm,5	13cm	8cm,5	110	10	14	20
			220	5	7	10

Ces fours peuvent être placés sur des circuits compris entre 80 volts et 250 volts environ.

Les fours verticaux sont généralement destinés à recevoir un creuset ; ils sont mobiles, de manière à faciliter les manœuvres, le creuset étant placé sur un support extérieur fixe. Les fours horizontaux s'emploient avec succès pour les analyses organiques, le dosage des impuretés dans les fontes et les alliages. Ils permettent d'opérer plus rapidement et plus méthodiquement qu'avec les appareils courants. On peut en outre les utiliser pour la détermination des points de fusion de nombreuses substances. Il suffit pour cela d'introduire dans la chambre de chauffe un échantillon (lame, tige) de la matière à étudier. A l'aide d'une petite fenêtre en quartz fondu ménagée dans la paroi, on suit l'opération et, en même temps qu'on constate la fusion, on note la température à l'aide d'un couple thermo-électrique et d'un galvanomètre.

Fours pour chauffage à basse température. — Les résistances sont constituées par des éléments formés d'une bougie en terre siliceuse spéciale sur laquelle se trouve enroulé un fil métallique en alliage résistant de grande durée. Chacun de ces éléments est amovible et facile à remplacer. Pour régler la température dans des limites déterminées, on fait usage d'un rhéostat.

On applique ce dispositif de chauffage aux entonnoirs en cuivre pour filtrations à chaud, aux étuves à vide, aux étuves à air chaud,

aux étuves à culture, aux étuves à bain de sable, aux générateurs d'eau chaude, aux bains de sable, aux bains-marie, etc.

Fours à tube à température uniforme. — Un four électrique à température uniforme pouvant être maintenue pendant un temps suffisamment long est précieux à plus d'un titre. Diverses solutions ont été proposées, mais la difficulté réside surtout dans les précautions à prendre pour l'obtention d'un réglage convenable de la température. Le maintien d'une température uniforme dans une région d'un four électrique nécessite en effet, par principe, la compensation intégrale des pertes de chaleur dans tous les points de cette région ; cette compensation est d'autant plus facile à obtenir que les pertes par radiation et convection sont moins élevées. L'isolant calorifuge doit donc être assez épais pour que l'influence d'une température non uniforme dans le voisinage immédiat de l'appareil soit rendue négligeable, donc sans effet. Dans ce but, on peut avec avantage remplacer un isolant calorifique unique médiocre par un assemblage de couches alternées d'un conducteur et d'un isolant, qui donnent la même uniformité dans les pertes de chaleur, mais avec un retard bien moindre.

Les fours électriques à tubes ordinaires, dans lesquels on chauffe une colonne d'air, ont des pertes de chaleur non uniformes. Cependant, dans la colonne d'air, à condition d'éliminer la convection, il y a toujours une courte région dont la température est sensiblement uniforme ; sa longueur dépend de celle du four et, dans quelques cas, on peut utiliser un four suffisamment long pour qu'il existe une région *étendue* de température uniforme, sans qu'il soit nécessaire de prendre des précautions spéciales aux extrémités de l'appareil. Mais il semble plus facile, en pratique, d'augmenter la longueur de la région uniforme sans augmenter celle du four lui-même : l'introduction de *tampons* ou d'écrans isolants supprime les pertes aux extrémités par conduction ou rayonnement et donne un résultat aussi satisfaisant que l'allongement du four. A cet égard, il est toujours préférable, comme il a été dit plus haut, d'utiliser des tampons constitués par des couches alternativement conductrices et isolantes que des tampons faits d'une substance isolante homogène ; la première couche conductrice doit nécessairement être à l'intérieur du tampon,

au contact immédiat de la région à chauffer uniformément. On arrive à des résultats encore meilleurs en plaçant aux deux extrémités du tube un *réchauffeur à bobinage* destiné à compenser les pertes de chaleur en ces points ; on augmente ainsi la longueur de la région à température uniforme, cette longueur atteignant son maximum pour une certaine température. Ces deux bobines sont naturellement alimentées par un courant indépendant de celui alimentant la bobine principale qui entoure le tube de chauffe.

Un four horizontal est, à ce point de vue, bien préférable à un four vertical de mêmes dimensions, et cela pour deux raisons principales : 1° les courants de convection dans la colonne d'air y sont bien moins actifs ; 2° la distribution de la température sur ses bords extérieurs y est beaucoup plus régulière.

Dans le four Holborn et Day, on fait usage d'un seul bobinage, non uniforme, autour du tube de chauffe ; la température y est mieux répartie qu'avec un bobinage uniforme, avec un optimum pour un court intervalle de valeurs de cette température.

Waidner et Burgess utilisent, dans un même appareil, deux fours concentriques : le four extérieur est muni d'une bobine très longue, à spires resserrées vers les extrémités ; le four intérieur a une bobine plus courte et à enroulement uniforme. Les chaleurs fournies au centre et vers les extrémités ne sont que partiellement indépendantes l'une de l'autre, de sorte que la compensation des pertes dépend encore de la température, moins toutefois qu'avec une simple bobine à enroulement non uniforme.

Dans le four Allen et Lombard, le tube est terminé à ses deux extrémités par deux bobines plates, qui ne recouvrent pas les tampons, et d'un revêtement d'amiante ; la bobine principale de chauffe est enroulée sur un tube d'alumine ayant 0^{mm},5 d'épaisseur de parois.

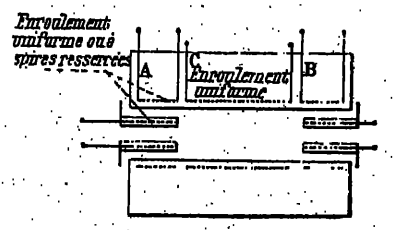


FIG. 12. — Four Ferguson à température uniforme (coupe schématique).

Le four de Ferguson (*fig.* 12 et 13), qui paraît le mieux conçu, a 45 centimètres de longueur. Il peut chauffer uniformément (à $\pm 0°,5$ près) une région de 6 centimètres de diamètre sur 10 à 12 centi-

mètres de longueur, à des températures comprises entre 620° et 1.200°; il permet en outre de maintenir la constance de cette température pendant des intervalles de temps assez longs. La figure 12 représente le schéma de l'appareil : les bobines terminales A et B peuvent être, soit à spires resserrées, soit à enroulement uniforme, mais la bobine centrale C est toujours à enroulement uniforme. La figure 13 représente une coupe du four par l'axe du tube de chauffe. L'enveloppe extérieure est en fer recouvert d'une peinture à l'aluminium ; cette dernière réduit la perte totale de chaleur en diminuant le rayonnement. Suivant la température à obtenir, les connexions électriques varient, ce qui permet de régler le four différemment d'après le genre d'essais à effectuer.

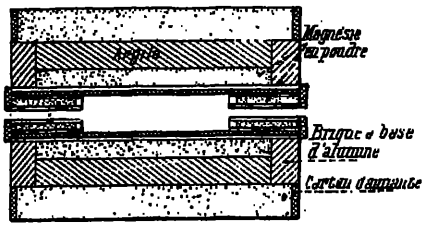


FIG. 13. — Coupe du four Ferguson (détails de construction).

CHAPITRE III

FOURS A ARC

Dans ce genre de fours, la chaleur est produite uniquement par la flamme de l'arc électrique agissant directement sur les matières à traiter, sans interposition d'aucune autre substance. L'arc peut être produit horizontalement ou verticalement, entre deux électrodes ou entre une électrode et le creuset constituant alors la seconde électrode.

Fours à arc horizontal. — Au type *four à arc horizontal* se rattachent les appareils de Clerc, Moissan et Violle, Minet, etc. Le *four Moissan-Violle* comprend (*fig.* 14 et 16) un bloc de calcaire A

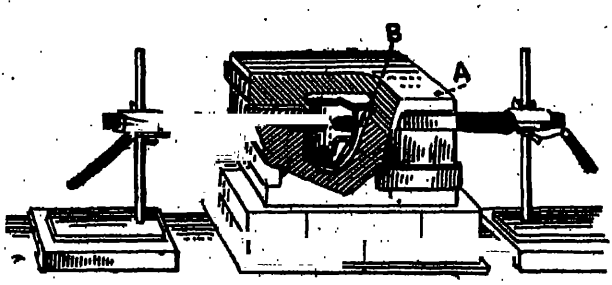


Fig. 14. — Four à arc, type Moissan-Violle.

creusé d'une cavité dans laquelle on place le creuset de fusion B qui peut être, comme nous l'avons vu, en charbon ou en magnésie. Ce creuset est surmonté d'un couvercle réfractaire et percé de deux ouvertures livrant passage aux électrodes. Ces dernières sont

supportées par des pinces en fer reposant sur des chariots permettant de les rapprocher ou de les éloigner suivant les besoins. Le courant leur arrive à l'aide de deux manchons de cuivre rouge de haute conductibilité armés de mâchoires entre lesquelles on écrase les câbles reliés au circuit extérieur. Pour un courant de 300 à 500 ampères, le creuset a de 50 à 75 millimètres de diamètre, et les électrodes de 30 à 35 millimètres. Le bloc calcaire a environ 20 centimètres de hauteur, 25 centimètres de largeur et 30 centimètres de longueur. Le couvercle, de même surface que le four proprement dit, a une épaisseur de 4 à 5 centimètres. L'appareil est maintenu mécaniquement par des bandes de fer. Il convient particulièrement aux expériences de fusion et de volatilisation ; cependant, il ne permet pas d'éviter l'action des gaz (acide carbonique, oxyde de carbone, hydrogène) qui remplissent peu à peu le creuset et proviennent, soit des électrodes ou du calcaire décomposé, soit de la vapeur d'eau qui prend naissance au cours des réactions.

Le four à tube (*fig.* 15) évite cet inconvénient. Il diffère du précédent par la suppression du creuset et son remplacement par un tube de charbon ayant de 1 à 5 centimètres de diamètre et traversant le four perpendiculairement aux électrodes au sein même de l'arc.

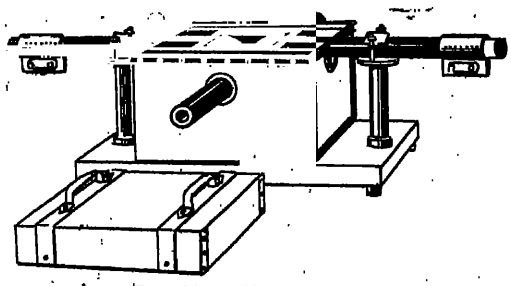


Fig. 15. — Four à tube.

Les corps à traiter sont placés dans ce tube qui, pour éviter l'action du carbone, peut avoir un revêtement intérieur en magnésie. En lui donnant un diamètre suffisant, on peut y introduire un creuset contenant les matières à traiter et, au besoin, le faire traverser par un courant gazeux.

C'est à l'aide de cet appareil que Moissan a pu obtenir pour la première fois un grand nombre de carbures, borures et siliciures par union directe des éléments à l'état de vapeurs. Pour les expériences de volatilisation, on emploie le four à creuset (*fig.* 16), mais

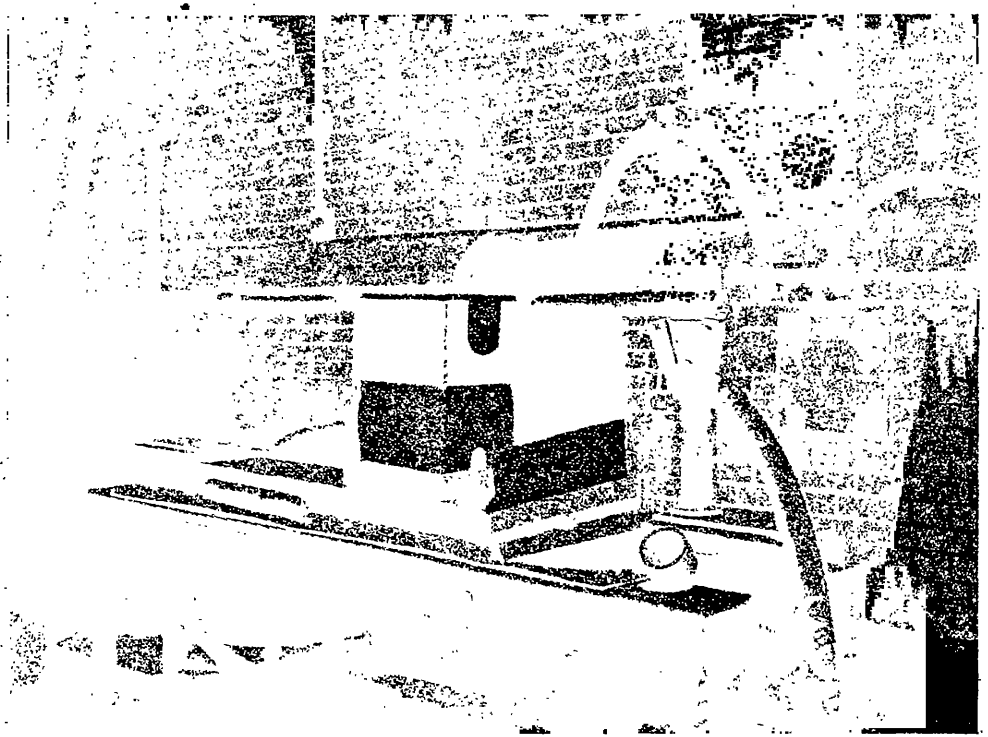


Fig. 16. — Four à arc, type Moissan-Violle (appareil ouvert).

INSTITUTE OF SCIENCE
LIBRARY
BANGALORE.

on perce le couvercle d'une ouverture au-dessus de laquelle on place un appareil de condensation quelconque, une cloche de verre quartzeux par exemple; on constate aisément l'émission de vapeurs et leur condensation. Les cristallisations de substances difficilement fusibles (chaux vive, strontiane, baryte, oxydes et silicates divers) sont aisément réalisables avec ces appareils dont le maniement est des plus simples.

Le *four Clerc-Minet* est basé sur cette constatation que la longueur d'un arc jaillissant dans une cavité ménagée au centre d'une masse réfractaire (chaux ou magnésie) peut atteindre plusieurs centimètres pour des constantes électriques moyennes, 40 ampères sous 50 volts par exemple. Pour une force électromotrice constante, soit 50 à 60 volts, on peut donner à l'arc une longueur quelconque, à condition de faire varier la section transversale de la cavité proportionnellement à une certaine puissance (plus grande que l'unité) de la longueur de l'arc et, en même temps, l'intensité du courant proportionnellement à une autre puissance (plus petite que l'unité) de cette section. Les valeurs de ces puissances correspondent à une température de l'arc sensiblement constante. L'arc étant bien établi, on peut y introduire un creuset en substance réfractaire conductrice (charbon) ou non conductrice (chaux, magnésie), sans que l'arc s'éteigne ni que ses constantes électriques se modifient sensiblement.

Le four établi d'après ces principes se compose de deux corps principaux A et F (*fig.* 17) en substance réfractaire. Le corps A est percé, suivant son axe vertical, de deux trous cylindriques : l'un B constitue l'enceinte proprement dite et a 3 centimètres de diamètre sur 6 centimètres de hauteur ; l'autre livre passage au creuset de réaction C dont la capacité est de 2 centimètres cubes environ. Le creuset est maintenu et dirigé dans l'axe par un support S qui s'appuie sur un bras terminé par une glissière à vis d'arrêt G et pouvant coulisser le long d'un des pieds P de l'appareil. Il peut ainsi occuper une position quelconque dans l'enceinte B, suivant l'écartement des électrodes E, qui sont en charbon. Le bloc F, percé d'une couverture, forme couvercle et permet le dégagement des vapeurs.

En employant des puissances électriques de 1 à 2 kilowatts, on

865
669.8 N20

peut effectuer, au moyen de ce four, des recherches par voie sèche à toutes températures, depuis le rouge sombre, le creuset et les électrodes occupant les positions représentées par la figure 17, jusqu'à la température de l'arc (positions de la figure 18). La capacité du creuset permet d'opérer sur 2 à 40 grammes de matières, suivant la densité de ces dernières.

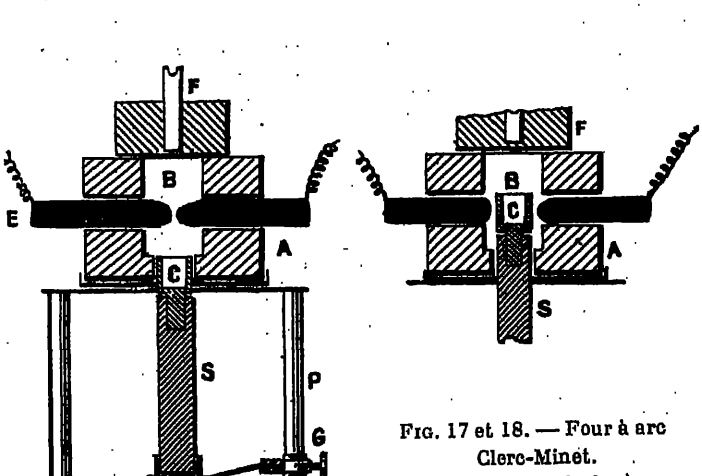


FIG. 17 et 18. — Four à arc Clerc-Minet. (Coupes verticales.)

Avec des densités de 30 à 40 ampères, l'arc se maintient malgré l'usure des charbons. On peut du reste écarter les électrodes jusqu'à l'extrême limite sans qu'il s'éteigne ; lorsque, après avoir retiré complètement une électrode de l'appareil, on l'y introduit de nouveau rapidement, l'arc se rallume à distance. Le courant dérivé par les parois du four portées à la température de fusion de la magnésie est insensible.

Le *four Gabreau*, qui a été utilisé au laboratoire d'essais du Conservatoire national des arts et métiers, comporte deux arcs montés en série sous 110 volts ; un rhéostat de réglage permet d'ailleurs de faire varier la tension aux bornes.

Le creuset, placé entre les deux arcs, est soutenu par une pièce réfractaire qui traverse le fond du four. On peut lui donner à la

fois un mouvement de rotation sur lui-même et un mouvement vertical de montée et de descente. Le premier mouvement est obtenu à l'aide d'une courroie actionnée par un petit réducteur de vitesse qu'entraîne un moteur électrique, la courroie faisant tourner l'arbre vertical qui porte le creuset. Le second mouvement est provoqué par un électro-aimant qui attire ou repousse cet arbre, suivant que le circuit, alimenté sous 110 volts, est interrompu ou établi par un commutateur monté sur le réducteur de vitesse précédent.

Ce dispositif permet de réaliser rapidement et régulièrement des opérations de fusion ou de trempe. C'est ainsi qu'en partant du four froid, on peut fondre aisément 300 grammes de nickel en un quart d'heure, avec un courant de 75 ampères.

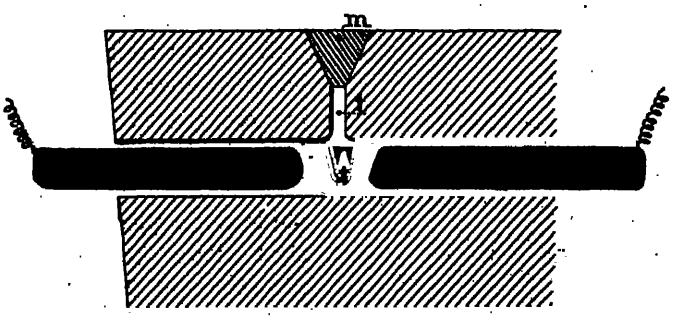


FIG. 19. — Dispositif de l'auteur pour le chauffage intensif des creusets.

En faisant jaillir l'arc électrique dans une enceinte réduite et limitée par une paroi très épaisse, on peut atteindre une température très élevée, les déperditions de chaleur étant presque nulles. La chambre de chauffe contenant le creuset A (*fig.* 19) est très exiguë et la matière se trouve portée à la température maximum au sein même de l'arc. Un bouchon réfractaire *m* ferme l'ouverture étroite *t* qui sert à l'introduction des substances à traiter ou au dégagement des produits volatils.

Fours à arc vertical. — Au type *four à arc vertical* se rattache le four Poulenc et Meslans (*fig.* 20 et 21) dont le creuset *m* peut être

mis à découvert pour l'examen des réactions en cours, son chargement ou son remplacement. Il comprend deux parties A et B réunies par une charnière *ab*.

Le bloc inférieur renferme le creuset *m*, relié directement à l'électrode inférieure E et mobile verticalement en même temps qu'elle. L'électrode supérieure E′ peut être descendue ou remontée à volonté par un écrou à serrage mobile *s*. Les tubes *t* et *u* servent à l'introduction des matières dans le creuset ou à l'arrivée d'un courant gazeux quelconque dans la chambre du four au sein des matières réagissantes. L'étanchéité de cette chambre est assurée par des joints d'amiante qui permettent à l'appareil de servir au besoin de four à distillation. Sa manœuvre est très simple, l'arc étant amorcé en abaissant l'électrode supérieure E′ à l'aide de la pièce *s*. On maintient l'arc stable à l'aide d'écrous qui fixent les charbons dans la position convenable. Ce four se construit de dimensions variées, l'électrode E′ pouvant avoir jusqu'à 4 centimètres de diamètre et la puissance absorbée atteindre 15 kilowatts.

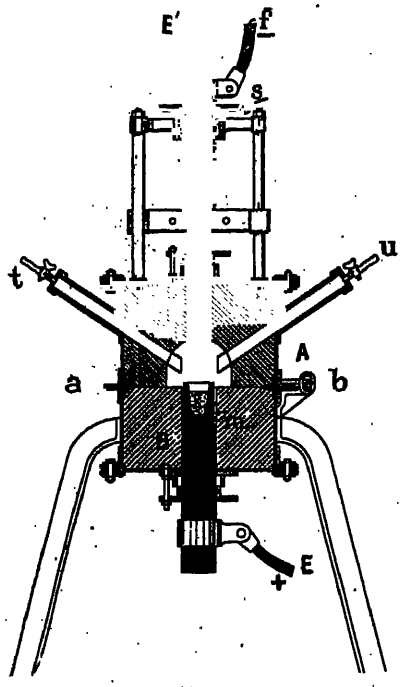


Fig. 20. — Four à arc vertical (Coupe du four fermé).

Il est du reste facile de construire soi-même un petit four de laboratoire à arc vertical, peu coûteux et permettant cependant d'effectuer de nombreuses recherches ou démonstrations en adoptant le dispositif représenté par la figure 22. Il comprend essentiellement deux blocs de chaux A et B qu'on a découpés à la scie dans de gros fragments de cette matière et percés d'une cavité cylindrique pour le passage des électrodes.

Le bloc supérieur B est muni en outre de deux ouvertures *m* et *n* servant, la première *m* à l'introduction des matières à traiter ou à fondre, la seconde *n* au dégagement des vapeurs si le four doit être utilisé comme appareil de distillation. Comme dans le four Poulenc et Meslans, on utilise un creuset-électrode C relié directement à l'un des pôles du circuit. On peut aussi, en vue d'assurer l'étanchéité et l'isolement calorifique de l'ensemble, entourer l'appareil de feutre d'amiante et, en outre, le protéger mécaniquement par un revêtement en tôle de fer un peu épaisse.

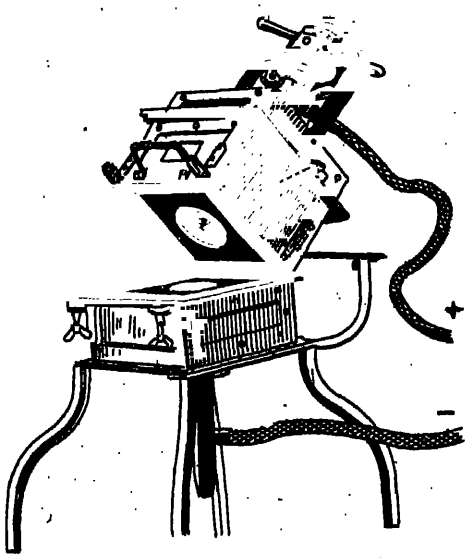


FIG. 21. — Four à arc vertical (Vue extérieure du four ouvert).

Dans ces sortes de fours à électrode verticale, l'arc jaillit entre l'électrode supérieure et le creuset au début de l'opération, puis entre l'électrode supérieure et la matière contenue dans celui-ci ; le rendement thermique de l'appareil est ainsi porté à son maximum.

Fours pour réactions entre gaz. — Lorsque le four ne doit être utilisé que pour des recherches ou réactions relatives à des produits gazeux, comme cela se présente dans de nombreux cas d'expériences synthétiques, on peut adopter des dispositifs différents des précédents. Ces *fours pour réactions entre gaz à haute température* comportent en principe l'emploi d'un arc entre charbons ou métaux, les électrodes pouvant jouer un rôle chimique prévu dans les réactions en cours et le produit à obtenir. Lorsque ce dernier doit être condensé, il est souvent nécessaire d'adjoindre à l'appareil un refroidisseur.

L'œuf électrique de Berthelot, qui a permis à ce savant de réaliser la synthèse de l'acétylène, est le type de ces appareils. C'est un véritable four électrique composé de deux électrodes en charbon dont l'une est creuse et sert à l'introduction de l'hydrogène au sein même de l'arc. La vapeur de carbone s'unissant à l'hydrogène donne de l'acétylène. La paroi de l'appareil est un globe de verre.

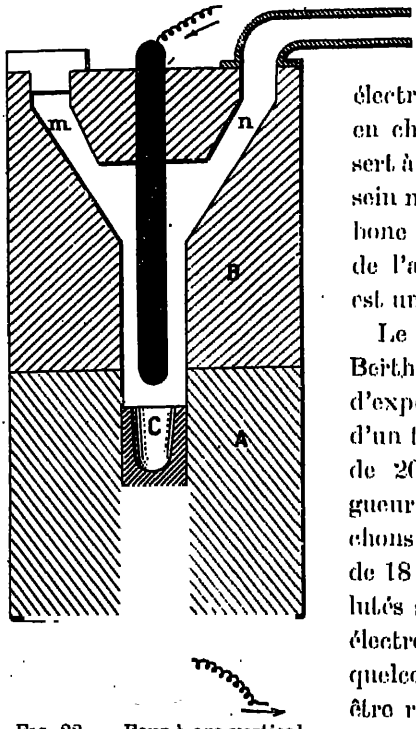


FIG. 22. — Four à arc vertical et à creuset mobile.

Le four Salmon, qui dérive de l'œuf Berthelot, mais qui est susceptible d'expériences plus variées, se compose d'un tube de quartz fondu A (*fig.* 23) de 20 centimètres environ de longueur ; ce tube est fermé par des bouchons en quartz *m* percés d'un trou de 18 à 20 millimètres de diamètre et lutés sur le tube avec du plâtre. Les électrodes E, E′, d'une composition quelconque, sont creuses et peuvent être rapprochées à la main bien que serrées contre les bouchons *m* par des feuilles d'amiante. Les gaz à faire réagir entrent par l'une des électrodes et sortent par l'autre ; ils doivent ainsi passer par l'arc lui-même avant de s'échapper de l'appareil et l'on se trouve dans les meilleures conditions pour que les réactions aient lieu.

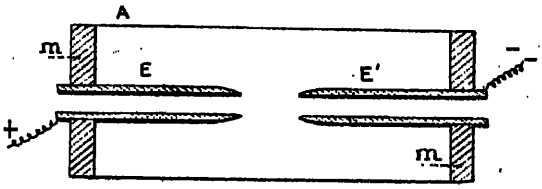


FIG. 23. — Four pour réactions entre gaz.

Avec des électrodes de charbon de cornue, il est facile de réaliser de multiples réactions telles que : union de l'hydrogène et du carbone pour la produc-

tion de l'acétylène, décomposition de la vapeur d'eau avec produits variables suivant l'intensité du courant, combinaison du gaz ammoniac avec le carbone et production de cyanure d'ammonium, union directe de l'azote et du carbone avec production de cyanogène, fabrication de l'acide nitrique, etc.

On sait que le cuivre ne décompose pas l'eau à la température des fourneaux ou du moins ne produit qu'une décomposition très faible. Cette décomposition s'effectue sans difficulté dans l'arc jaillissant entre deux tubes de cuivre. Avec un courant de six ampères seulement, on peut recueillir en quelques minutes 10 centimètres cubes d'hydrogène et reconnaître ensuite la production d'oxyde de cuivre fondu. Cette dernière expérience montre combien il est aisé, à l'aide de ce dispositif simple, de réaliser rapidement des décompositions très difficiles à obtenir avec des fourneaux ordinaires.

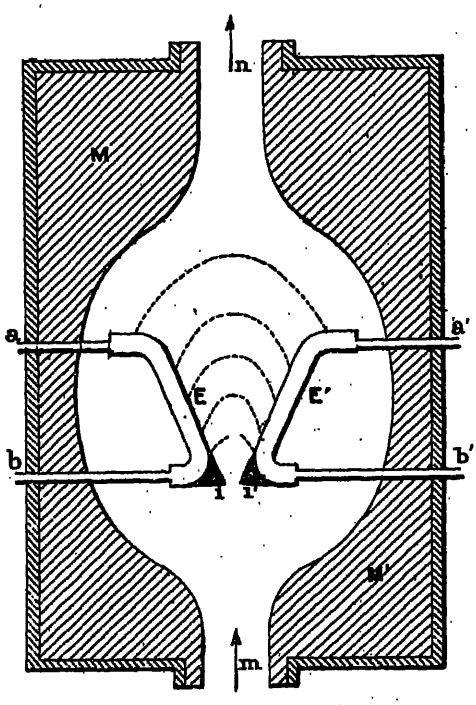


FIG. 24. — Four continu pour réactions chimiques gazeuses.

Le dispositif représenté par la figure 24 et qui a été appliqué industriellement à la fabrication de l'acide nitrique (procédé Pauling), peut être employé avec succès dans les laboratoires. Il comprend une chambre à parois réfractaires M, M', dans laquelle se trouvent deux électrodes creuses en fer E, E' traversées par une circulation d'eau *ab*, *a'b'*. Elles forment entre elles un V et, à leur partie inférieure, possèdent deux couteaux *i*, *i'* destinés à amorcer l'arc.

Lorsque l'appareil est en fonctionnement, l'arc obéissant au courant d'air chaud ascendant qui l'entraîne vers la partie supérieure

des électrodes, quitte les points d'amorçage i, i' et s'agrandit sans cesse en prenant la forme indiquée par les courbes pointillées, comme dans un parafoudre à cornes. Il finit par s'éteindre, mais se rallume en i, i' et cela constamment, de sorte que les substances gazeuses qui entrent dans l'appareil en m sont en pleine réaction dans l'arc et ne s'échappent par l'ouverture de sortie n qu'une fois transformées.

Cet appareil est très pratique en ce sens qu'il supprime toute manipulation des électrodes, qu'il évite l'échauffement de ces dernières et l'emploi du carbone dont la présence est souvent gênante dans les réactions entre gaz. Les électrodes sont du reste interchangeables et leur remplacement ne demande que quelques minutes. Enfin, on peut rendre l'appareil complètement étanche et, s'il y a lieu, opérer dans le vide ou, au contraire, sous une pression supérieure à la normale.

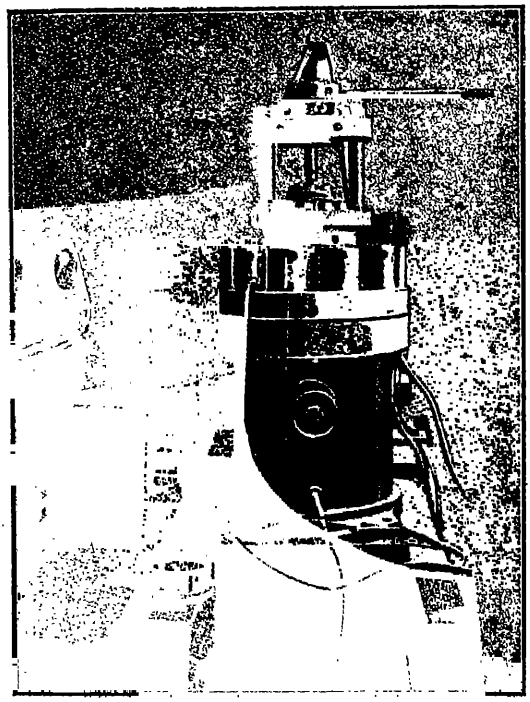


FIG. 25. — Four pour expériences à hautes pressions ou dans le vide.

Fours pour expériences à hautes pressions ou dans le vide. — Lorsqu'on a besoin de très fortes pressions, il est souvent nécessaire d'utiliser des fours avec revêtement extérieur en acier. La figure 25 représente un de ces appareils, dû à Petavel. Il a pour principal but l'étude de l'action

des hautes températures sur des mélanges gazeux fortement comprimés (jusqu'à 200 kilogrammes par centimètre carré).

L'enveloppe extérieure en acier est entourée d'une circulation d'eau et protégée, à l'intérieur, par une chemise de fonte facile à remplacer. Le couvercle est maintenu en place par une série de forts boulons. L'appareil porte une ouverture servant à l'admission des gaz sous pression ; un manomètre mesure cette pression et un oculaire permet, le cas échéant, d'observer l'intérieur du four.

Les porte-électrodes pénètrent dans le four par les deux extrémités inférieure et supérieure ; ils sont isolés du corps de l'appareil par des revêtements en mica et des presse-étoupes garnis d'amiante, étanches aux gaz. Un orifice central permet d'insuffler ou de prélever du gaz au centre même de l'arc.

On constate qu'à 29 atmosphères, l'usure des charbons est de vingt fois supérieure à celle qui a lieu à la pression normale. Les électrodes en cuivre, en fer ou en aluminium peuvent être fondues en présence d'air à 100 atmosphères de pression sans oxydation sensible. L'action des gaz oxygène, azote, oxyde de carbone, de la vapeur de carbone, des vapeurs métalliques, de silicium, de bore, etc., à des pressions variées est des plus intéressantes ; elle permet, indépendamment de tout effet électrolytique, d'étudier de multiples réactions jusqu'ici mal définies de même que la réversibilité de certaines équations chimiques en apparence stables à la pression ordinaire.

Le même appareil peut servir aux expériences dans le vide à des températures comprises entre 1.500° et 2.500° environ.

Fours à arc diphasés et triphasés. — Ces fours, encore peu employés dans les laboratoires, peuvent rendre service lorsqu'on a besoin d'une chaleur à la fois élevée et régulière comme, par exemple, dans la fusion des métaux, des alliages, des silicates, c'est-à-dire lorsque le produit final doit avoir une constitution physique très homogène.

Le *four Rennerfeld* (*fig.* 26) répond à ces desiderata. Il utilise des courants diphasés circulant à travers trois électrodes : une électrode centrale A descendant verticalement de la partie supérieure et deux électrodes, B et C, une de chaque côté de la première, pla-

cées latéralement. Aucune des trois ne vient en contact avec la matière renfermée dans le creuset M, mais, au contraire, les arcs formés brûlent librement. Chaque phase alimente une des deux électrodes horizontales et un câble de retour réunit le point commun des deux phases à l'électrode A. L'action du courant de retour dans cette dernière engendre un flux de force qui dévie les arcs vers la matière du creuset M en leur donnant ainsi une forme spéciale et concentrant toute la chaleur de la flamme vers le point utile. On

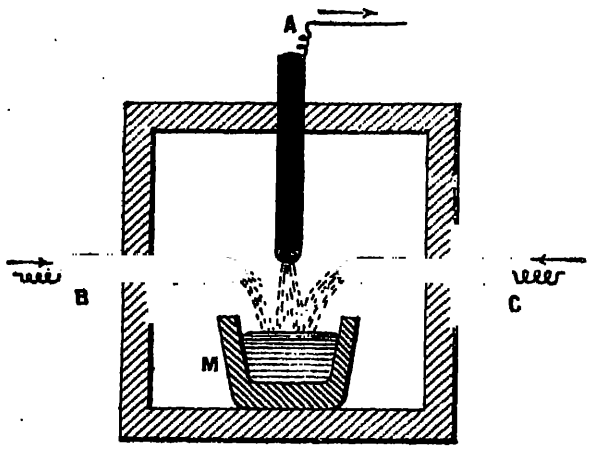


FIG. 26. — Four à arcs diphasés.

peut du reste porter le rendement à son maximum en donnant à la partie supérieure du four la forme d'une voûte, de sorte que la chaleur émise par les arcs se trouve réfléchie sur le bain fondu du creuset par la surface de cette voûte.

Le *four Billon-Daguerre* utilise des courants triphasés et trois électrodes de charbon avec la disposition dite en étoile. Le creuset A (*fig.* 27 et 28) est constitué par un mélange de graphite et de carborundum ou par du graphite pur, un métal à point de fusion élevé ou de la magnésie. Il se compose de deux compartiments superposés *a* et *b*. Le compartiment supérieur *a*, de capacité assez grande, reçoit la matière à fondre ; il est fermé par un couvercle *s* qui recouvre en même temps la partie supérieure du four et est en outre muni d'une ouverture à bouchon *i*. Le compartiment infé-

rieur *b* est de plus petite capacité ; il est réuni au premier par une ouverture cylindrique qui peut être, au besoin, obturée par une vanne *e* en matière réfractaire et mobile horizontalement. La matière fondue en *a* s'écoule en *b* où l'on peut la puiser ou achever de la rendre plus malléable.

Le four proprement dit (*fig.* 29) est en briques réfractaires ; les briques en magnésie ne conviennent qu'imparfaitement pour ce genre de four, car vu la chaleur dégagée, elles se volatilisent plus ou moins rapidement en produisant de gros flocons blancs qui gênent la respiration des opérateurs. Les briques en silice presque

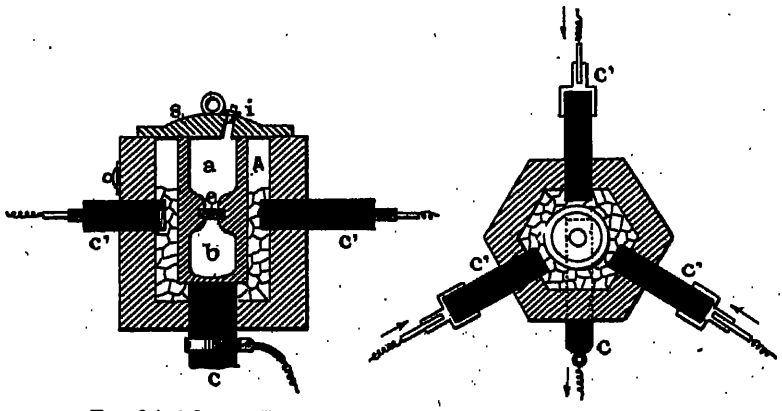


Fig. 22 et 23. — Four à arcs triphasés, type Billon-Daguerre.
(Coupes verticale et horizontale.)

pure sont plus durables. Le creuset est placé directement sur le charbon vertical *c* (*fig.* 27) réuni électriquement au point neutre ou commun de la distribution triphasée. Les trois charbons horizontaux *c'*, correspondant aux trois phases du circuit, sont reliés à des câbles en communication électrique avec ce dernier. Le courant a un voltage de 60 volts. Entre chacune des trois électrodes *c'*, on place de petits grains de charbon de cornue ; il y a bien trois arcs continuels entre le creuset et les électrodes *c'*, mais si un arc devient trop long ou trop court, les grains de charbon servent de régulateur-compensateur en agissant comme résistance entre les trois arcs.

Cet appareil est donc un four à trois phases équilibrées ; les aiguilles des trois ampèremètres montent et descendent du reste en même temps. Il a surtout été utilisé jusqu'ici comme appareil de fusion, notamment pour celle du cristal de roche pur, des matières quartzeuses, minérales ou métalliques, avec lesquelles il a donné de très bons résultats.

Fours à arc au mercure. — Cet appareil, dû au Dr Weintraub, est un merveilleux instrument de recherches. On l'emploie pour la fusion et la purification des éléments les plus réfractaires tels que le tungstène, l'osmium, le thorium, le bore. Dans ce but on utilise comme anode, dans un arc à mercure jaillissant dans le vide, des baguettes ou des agglomérés préparés par compression des poudres des éléments à fondre ou à obtenir à l'état pur.

Il comprend (*fig.* 30) une cloche en fer, en cuivre ou en verre G reposant sur un socle de talc par un joint étanche formé d'une rigole de mercure *n*. Une capsule de cuivre rouge massif A refroidie par un courant d'eau *e* sert d'anode et de support pour la matière à traiter S. La cathode est constituée par un filet de mercure *b* amené par un tube de quartz *t* et qui passe au-dessus et à une distance convenable de la charge S. Ce filet de mercure provient d'un réservoir spécial *m*.

L'arc V peut être amorcé par une décharge à haute tension. On peut aussi amorcer d'abord le filet de mercure avec l'anode A. On augmente la pression ; l'arc jaillit, puis s'établit normalement, et le jet de mercure cathodique est reçu dans un réservoir latéral M. La cloche G, si elle est en métal, est munie d'une fenêtre permettant l'observation de l'arc et de la marche de l'opération. On fait le vide dans l'appareil par la tubulure *f*.

Le principal avantage de ce dispositif est que l'électrode vaporisable (mercure) est constamment renouvelée et, par cela même, refroidie régulièrement. On peut ainsi utiliser des arcs de grande puissance et obtenir des températures très élevées. Les éléments réfractaires à fondre ou à purifier ne nécessitent pas d'agglomérant et on peut les mettre directement dans l'anode formant creuset.

Ce four a d'abord été employé pour la préparation du bore chimiquement pur et à l'état fondu par la dissociation du sous-

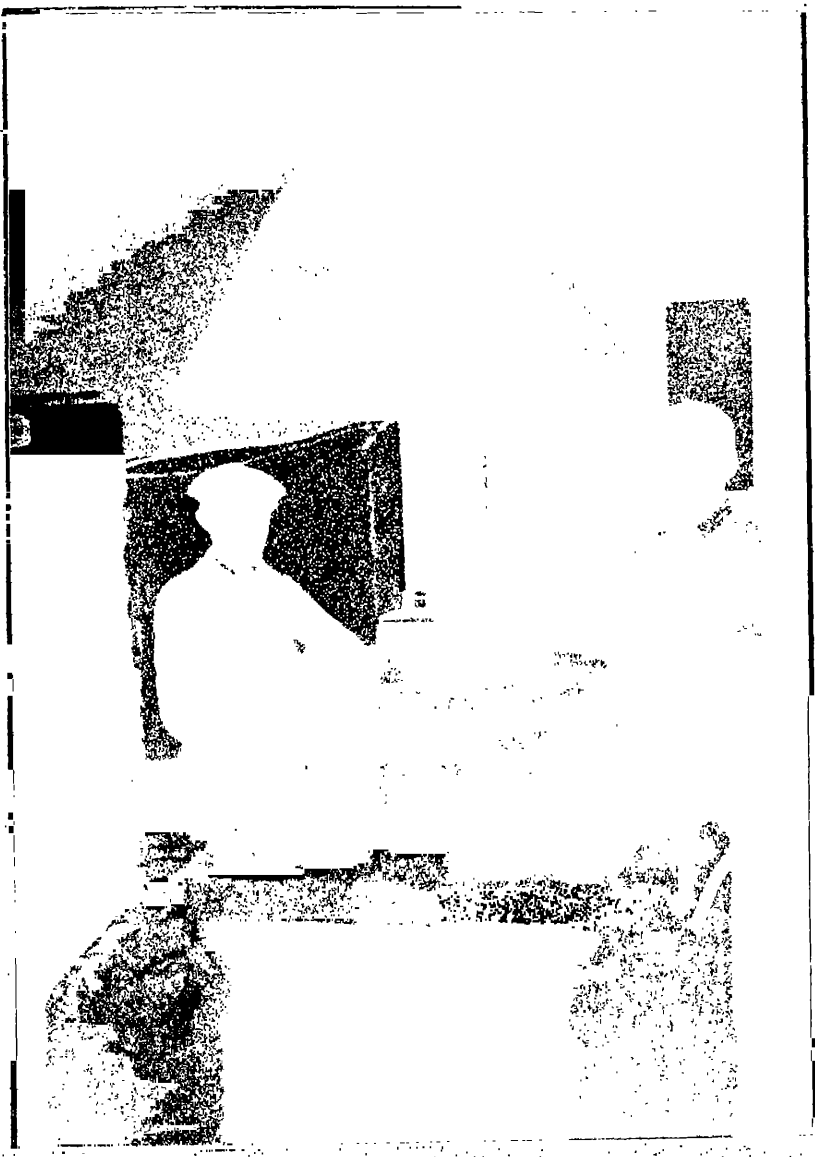


FIG. 29. — Four à arcs triphasés, type Billon-Daguerre.

yde de bore. Ce corps n'entre en effet en fusion qu'à 2.300°. La ésence du carbone étant évitée, aussi bien dans les électrodes ie dans l'atmosphère de la réaction, on arrive à supprimer totalement la carburation des éléments ainsi préparés. C'est là un avan-

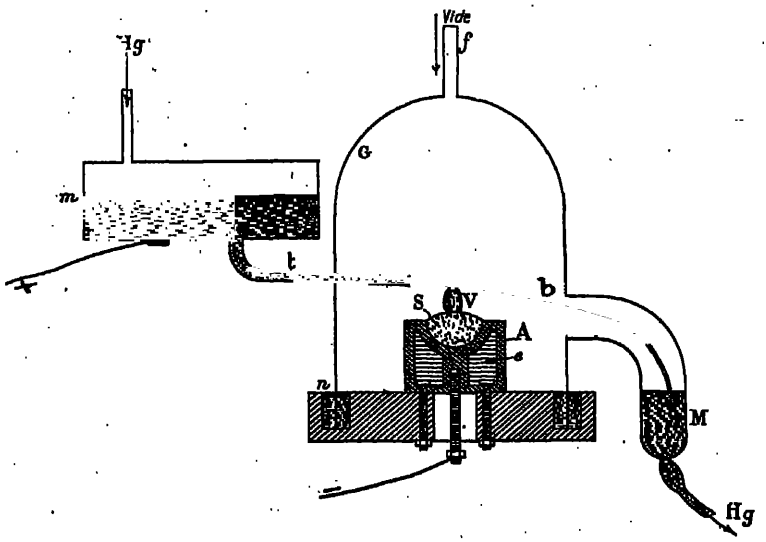


FIG. 30. — Four à arc au mercure pour la fusion des métaux réfractaires.

ge précieux, un grand nombre de corps s'unissant aisément au rbone à haute température. C'est en particulier le cas du bore ui, au-dessus de 1.700°, forme du borure de carbone ou carbure de ore.

CHAPITRE IV

FOURS A ARC ET RÉSISTANCE

Fours à sole conductrice. — Ces fours ont comme type les fours à carbure de calcium et aluminium employés dans l'industrie, avec, bien entendu, des dimensions beaucoup moindres. Tels sont en particulier les fours Héroult de petite capacité, à une ou deux électrodes verticales, utilisés dans les laboratoires industriels comme petits fours d'essais, et les fours à expériences du même inventeur.

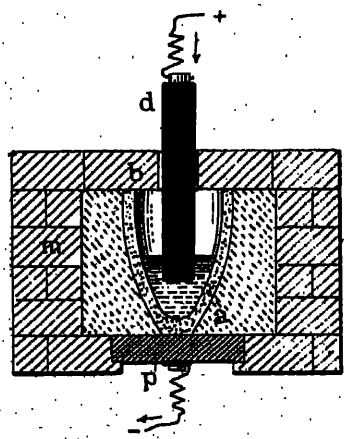


FIG. 31. — Petit four Héroult pour expériences.

Le four à expériences comprend (*fig.* 31) un creuset *a* disposé sur une plaque *p* en charbon aggloméré ou graphitique. Une enceinte réfractaire *m* entoure ce creuset, mais en est séparée par une épaisseur suffisante de poudre de charbon. Le couvercle *b* est percé d'une ouverture destinée au passage de l'électrode verticale supérieure *d* en charbon. L'autre électrode est formée par le creuset lui-même.

Au début, le four est mis en marche en abaissant l'électrode supérieure qui, au contact d'un peu de matière contenue dans le creuset, forme un arc.

On ajoute peu à peu le métal à fondre ou le mélange des sels à

faire réagir, de sorte que le four fonctionne ensuite par résistance, le courant traversant de part en part la matière renfermée dans le creuset. Cet appareil est avant tout un four de fusion. Il convient particulièrement bien à la fabrication de l'aluminium et de ses alliages, des carbures et siliciures métalliques, des ferro-alliages, etc.

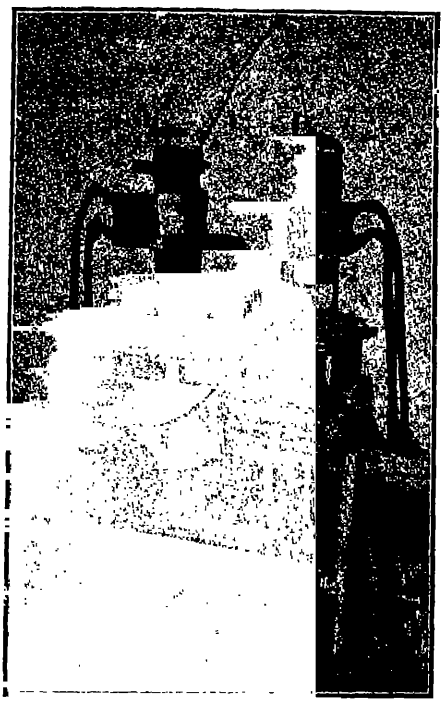


FIG. 32. — Four d'essai Héroult à deux électrodes verticales (vue extérieure).

Dans les appareils à deux électrodes verticales (*fig.* 32 et 33), il y a en réalité deux arcs, l'un entre l'électrode d'arrivée du courant E et la matière renfermée dans le creuset, l'autre entre cette même matière et l'électrode de sortie du courant E'. Ces deux arcs sont donc en série. Quand le four fonctionne, il n'y a plus d'arc et l'appareil marche en résistance.

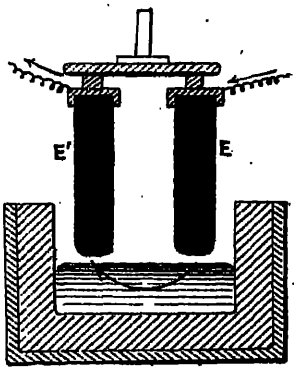


FIG. 33. — Four d'essais Héroult à deux électrodes verticales (coupe schématique).

Les fours d'essais pour laboratoires peuvent contenir de 25 à 150 kilogrammes de charge. Les électrodes ont de huit à dix centimètres de diamètre. On les emploie surtout pour les essais concernant les aciers spéciaux, les ferro-alliages ; ils sont généralement basculants, de manière à faciliter l'évacuation des matières fondues.

Le *four Frilley* remplit le même but. Il comprend (*fig.* 34 et 35) une cuve en aluminium A de 30 centimètres de hauteur et 42 centimètres de diamètre, munie de deux pivots *e* supportés par un bâti métallique et autour duquel elle peut manœuvrer au moyen d'un levier. Cette cuve est remplie de pâte de carbone B dans laquelle on a ménagé une cavité cylindrique de 20 centimètres de diamètre environ formant le laboratoire du four. Un des câbles d'amenée du courant E (E′ de la figure 35) pénètre par la partie inférieure de la cuve et se trouve englobée dans la pâte de charbon. L'électrode supérieure F est cylindrique; elle a 80 millimètres de diamètre et est supportée par une chaîne commandée par un petit treuil T.

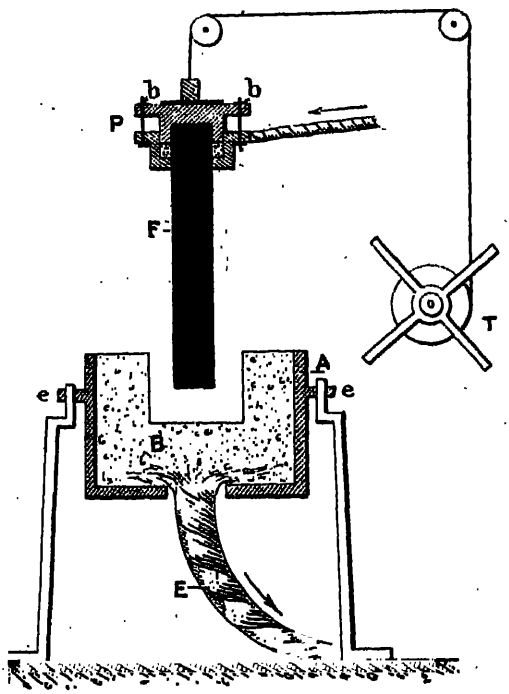


FIG. 34. — Four d'essais, système Frilley (coupe schématique).

Une semblable électrode, qui a 50 centimètres carrés environ de section, peut supporter au maximum un ampère par 10 millimètres carrés, soit 500 ampères en marche industrielle. Mais au cours d'essais ne dépassant pas 5 à 6 heures, on peut presque quintupler ce chiffre; en admettant un voltage moyen de 40 volts, cet appareil, de dimensions très réduites, peut travailler sans fatigue avec une puissance de 130 chevaux. La seule précaution importante à prendre tient au mode d'attache de l'électrode F et du câble d'amenée du courant à cette dernière. Le contact se fait à l'aide de poudre de graphite tassée fortement entre les deux parties de la pince serre-

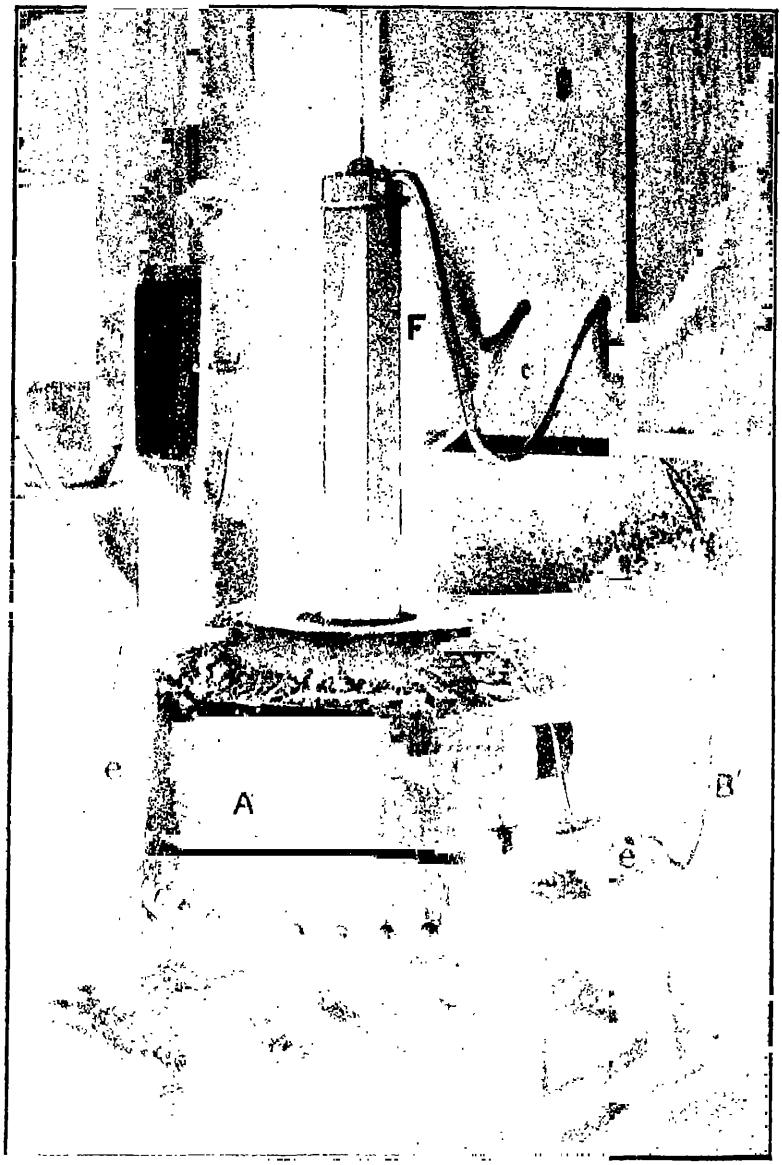


Fig. 35. — Four d'essais, système Frilley (vue extérieure du four en fonctionnement).

joint P ; la pression est donnée par une couronne de boulons *b*.

Ce petit four, très simple et très rustique, est d'un usage extrêmement commode ; employé comme appareil d'essais, il constitue un four de laboratoire des plus faciles à manier et d'un rendement élevé. Pour effectuer des fusions à l'abri de l'air, il est possible de le faire travailler comme four à résistance, c'est-à-dire sans arc. Pour cela on utilise des creusets de graphite qu'on introduit avec la matière à fondre et munis de leur couvercle luté dans la cuve de l'appareil. Le creuset est maintenu par du graphite en poudre que l'on comprime autour, puis on recouvre le tout de charbon de bois ou de coke sur lequel on amorce le courant. En opérant avec quelques précautions, de manière à échauffer progressivement le creuset pour éviter sa rupture, on peut fondre en quelques minutes une quantité relativement considérable de métal.

Ce genre de fours est de fabrication facile et a reçu de nombreuses applications. On peut du reste se dispenser de l'emploi d'un creuset et, pour supprimer le contact de l'air, utiliser simplement du verre fondu. C'est ainsi que pour la fusion des métaux et alliages non ferreux (cuivre, laitons, bronzes, etc.), on met le four en marche en chargeant la cuve de quelques morceaux de verre. Les électrodes sont mises presque en contact, de sorte que le verre fond dès l'amorçage de l'arc. Comme à l'état liquide et à haute température il est conducteur, on peut écarter les électrodes, c'est-à-dire relever l'électrode verticale et laisser l'appareil fonctionner par résistance.

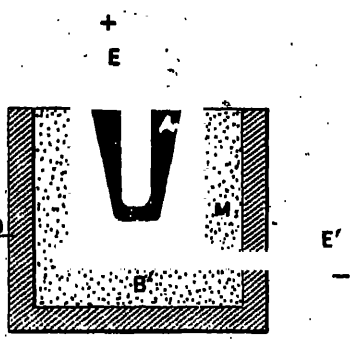


FIG. 36. — Four pour la préparation de l'aluminium et des alliages (coupe schématique).

Quand la température est suffisante, on charge les corps à fondre : le verre, moins dense, surnage et protège les métaux contre l'oxydation. Les pertes sont, par suite, réduites au minimum et la même quantité de verre peut servir un grand nombre de fois.

L'appareil représenté par les figures 36 et 37 est un four très simple spécialement destiné à la préparation, au laboratoire, de l'aluminium et des alliages. Il se compose d'un

creuset A fait d'un cylindre évidé au tour et reposant sur le bloc de graphite B relié au pôle négatif E'. L'électrode positive E est aussi en graphite. Le creuset a 13 centimètres de diamètre moyen ; il est placé dans une enceinte calorifuge et réfractaire M renfermée elle-même dans une matière isolante D. Dès que l'arc jaillit entre l'électrode E et le fond du creuset A, on introduit dans ce dernier de petits fragments de cryolithe et on le remplit progressivement jusqu'aux deux tiers au fur et à mesure de la fusion. Quand la masse est bien fluide (80 volts et 30 ampères), on règle la hauteur de l'électrode et on ajoute peu à peu 15 % d'alumine purifiée. Le voltage baisse à 10 ou 12 volts, tandis que l'intensité atteint 225 ampères en même temps qu'on voit des bulles d'oxyde de carbone se dégager autour de l'électrode E. On maintient ce régime en ajoutant de l'alumine au bain et, après une heure ou une heure et demie, on peut isoler de 20 à 30 grammes d'aluminium qu'il est facile de recueillir dans une lingotière de fer.

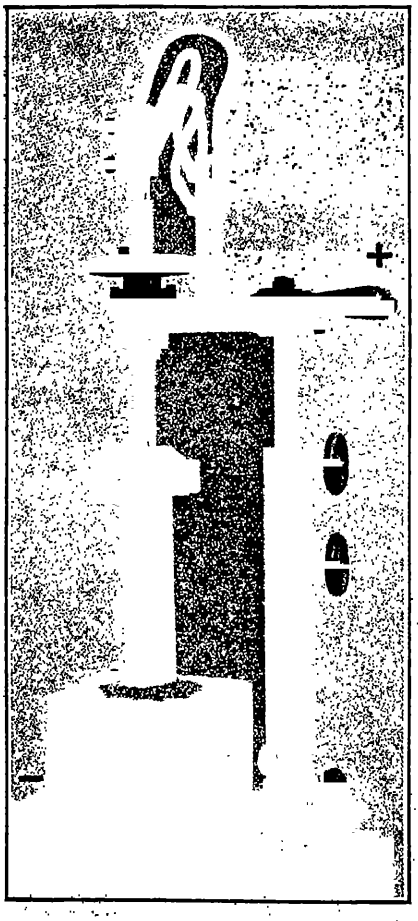


FIG. 37. — Four pour la préparation de l'aluminium et des alliages (vue extérieure).

Fours à pisés semi-conducteurs. — Lorsqu'on désire effectuer des essais pour lesquels la présence du carbone peut être un inconvénient comme carburant, il est facile de réaliser des pisés à la fois conducteurs

et réfractaires et ne contenant pas plus de 10 à 20 % de carbone. Ces pisés forment sole et sont reliés électriquement au câble d'amenée du courant à la partie inférieure du four. On emploie ainsi des mélanges variés : limaille de fonte (10 %), goudron (10 %) et dolomie calcinée (80 %) ; graphite (30 %), goudron (10 %) et dolomie (60 %), etc. On peut remplacer la dolomie par la magnésie ou le sable siliceux ; les résultats sont analogues. De plus, il est facile de faire diminuer la proportion de carbone au fur et à mesure qu'on se rapproche du fond de la cuve destinée à contenir les matières à traiter ou à fondre.

A la mise en route, le four étant froid, on met l'électrode verticale en contact avec la sole. Le courant passe d'abord d'une façon à peine perceptible, puis la masse s'échauffant rapidement, le four fonctionne rapidement. Après essai, et le four se refroidissant à nouveau, on constate que les pisés restent bons conducteurs ou tout au moins ont leur conductibilité très améliorée par un premier chauffage.

Les fours à pisés peu carbonés sont intéressants pour la fusion et l'essai des aciers et métaux ferreux, car ils permettent de travailler avec toute l'exactitude désirable, la faible teneur de la sole en carbone ne paraissant pas intervenir dans la composition des produits élaborés.

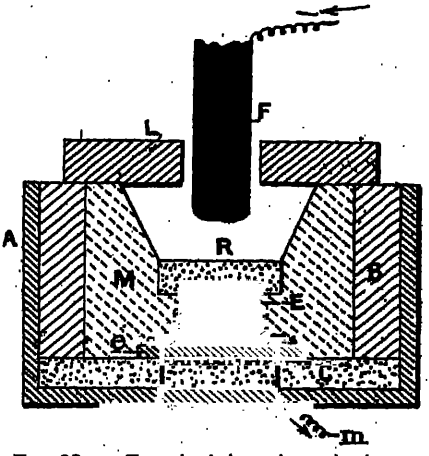


FIG. 38. — Four à pisé semi-conducteur.

Le four Pourcel (*fig.* 38), qui est utilisé au laboratoire d'essai des usines d'Imphy, est basé sur ces considérations. Il est formé d'une carcasse métallique A dont l'intérieur est revêtu, sur le pourtour, d'une chemise en briques alumineuses B destinées à empêcher les déperditions de chaleur par conductibilité. Sur le fond, et dans le même but, on dispose une couche de sable blanc siliceux C offrant une très faible conducti-

bilité. A l'intérieur de ces enveloppes calorifuges se trouve le revêtement réfractaire proprement dit M. L'électrode E est formée d'un bloc de carbone graphitique reposant sur une plaque de cuivre *e* et assujetti dans une position fixe à l'aide de boulons traversant la partie inférieure du four et permettant l'arrivée du courant à l'aide d'un câble *m*.

Le pisé R, qui forme la sole proprement dite du four, est très peu carboné et d'une épaisseur juste suffisante pour assurer le fonctionnement de l'appareil. L'électrode supérieure F est en charbon et traverse le couvercle du four L. Ce dernier évite les déperditions de chaleur. La capacité de la cuve est telle qu'elle peut contenir de 20 à 25 kilogrammes de métal. On peut fondre à l'heure environ 12 à 13 kilogrammes d'acier doux à 0,1 % de carbone avec une dépense correspondante de 18 kilowatts-heure, l'intensité étant de 350 à 400 ampères.

L'emploi de fours de moyenne puissance, à côté des fours à expériences proprement dits, semble avoir de plus en plus d'intérêt et même être une nécessité dans les *laboratoires industriels*. C'est ainsi que plusieurs Facultés et Instituts techniques ont eu l'idée d'installer des fours en vue du contrôle de la portée industrielle des brevets avant leur application. Tel est en particulier le four représenté par la figure 39, installé au laboratoire d'essais électrométallurgiques de l'Institut électrotechnique de Grenoble ; sa puissance est de 200 chevaux environ. Par son mode de construction, qui rappelle les fours du type Héroult à une électrode-sole fixe et une électrode supérieure mobile, il peut se prêter à des fabrications et essais variés.

Le problème du développement de l'industrie chimique et métallurgique en France semble du reste lié d'une façon très étroite à la création de multiples stations d'essais ; ces dernières sont déjà nombreuses à l'étranger, notamment en Allemagne et en Amérique. Des laboratoires, disposant de 500 à 600 chevaux convertibles en énergie électrothermique produite ou achetée à bon compte, seraient précieux pour les savants et les techniciens désireux d'essayer leurs procédés avant leur réalisation industrielle, sous le sceau de la discrétion d'un personnel impartial. Il y a là, conformément aux desiderata et aux progrès de l'industrie, tout un programme d'organisation technique à réaliser.

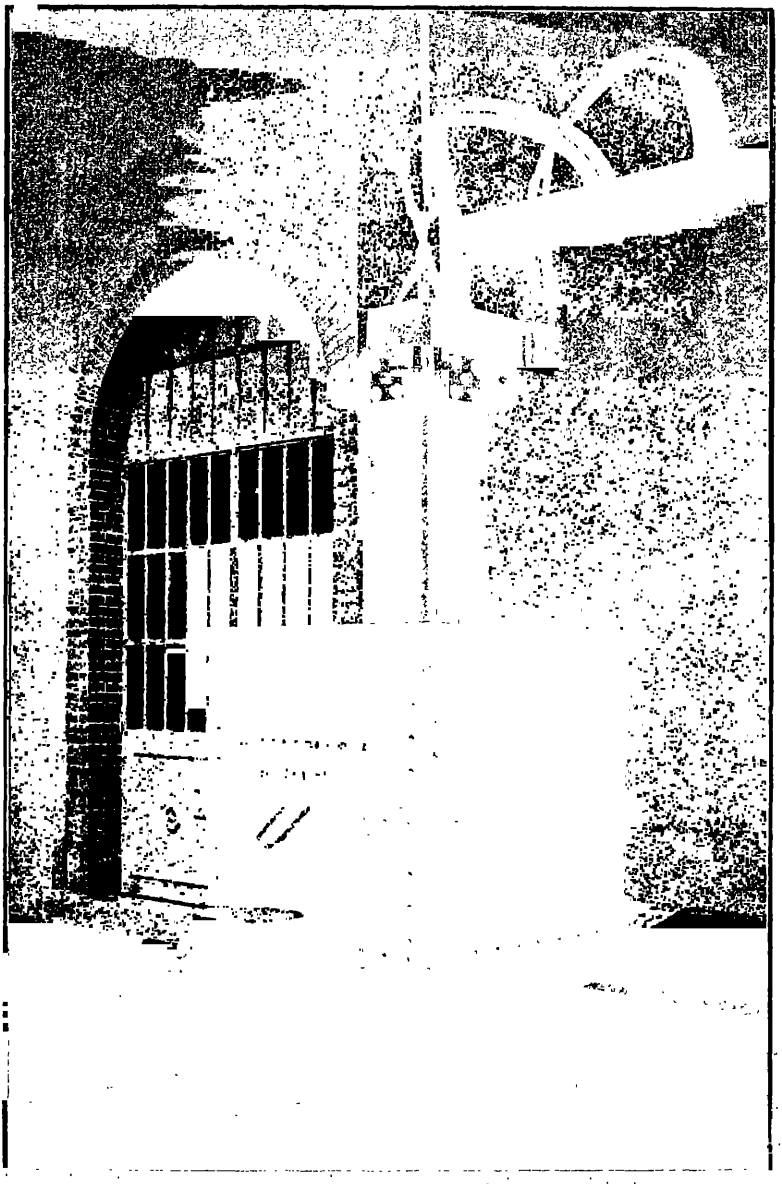


FIG. 39. — Four de 200 chevaux du Laboratoire d'essais électrométallurgiques de l'Université de Grenoble.

Fours à électrodes métalliques. — On a parfois intérêt à supprimer totalement les électrodes de carbone ou renfermant du carbone et à les remplacer par des électrodes métalliques. C'est le cas des opérations relatives à la fusion des métaux devant demeurer aussi purs que possible. Le four Borchers a été établi dans ce but. Il comprend une cuve en matière réfractaire M (*fig.* 40) revêtue extérieurement d'un manteau protecteur en tôle *t*. L'électrode de fond E est en acier ou en fer si le métal à fondre est un métal ferreux, ou en cuivre s'il agit de ce métal, de laiton ou de bronze ; elle est évidée à sa partie inférieure de manière à pouvoir être constamment refroidie par une circulation d'eau I. L'électrode verticale mobile F peut être en alliage ou en métal ; elle est du reste aisément remplaçable. L'appareil se termine à sa partie supérieure par un couvercle réfractaire en argile, quartz fondu, magnésie calcinée ou dolomie. Il est percé d'un orifice *s* servant à l'introduction des matières à fondre. Pour faciliter l'évacuation de ces dernières, l'appareil est mobile autour d'un axe horizontal *oo'*.

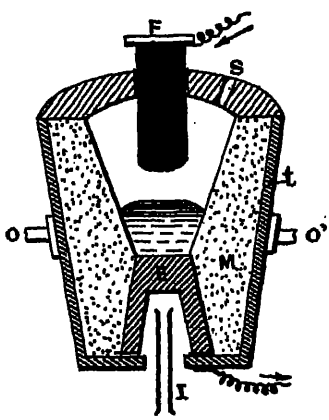


FIG. 40. — Four à électrode refroidie.

Pour mettre le four en service, on place quelques fragments de métal dans le fond du creuset, on met en marche la circulation d'eau en I, puis on ferme le couvercle et on abaisse l'électrode. L'arc jaillit, le métal fond en partie et permet d'introduire peu à peu la charge jusqu'au remplissage du creuset. Le four fonctionne ensuite à la fois par arc et résistance, soit que l'électrode supérieure ne touche pas le bain, soit qu'au contraire elle plonge dans celui-ci ou dans le laitier formé à sa surface s'il s'agit d'une opération d'affinage avec addition de fondant. On peut, suivant le cas, ménager un ou deux trous de coulée, destinés, l'un à la scorie, l'autre à la matière fondue.

Fours à effluves. — Pour la fusion des métaux réfractaires (tantale, etc.), on a utilisé des appareils à effluves rappelant les ampoules à vide et permettant d'obtenir, avec un matériel simple, des produits très purs. La masse à fondre (mélange aggloméré) est placée au foyer même de concentration des rayons, c'est-à-dire à l'anode. La cathode est disposée, comme d'ordinaire, en forme de miroir concave, en face de l'anode, de manière à diriger sur celle-ci le faisceau convergent de rayons qu'elle émet.

On peut aussi placer le métal à fondre au foyer commun des deux électrodes, lorsque le dispositif le permet, de façon à leur faire jouer alternativement le rôle de cathode. De la sorte, les rayons émis sont concentrés, alternativement aussi, sur la masse métallique et, pour une même consommation d'énergie et une égale quantité de matière à fondre, la durée de l'opération est beaucoup plus réduite.

Ce procédé présente plusieurs avantages. Il permet d'opérer directement dans le vide, condition nécessaire pour l'obtention de produits purs. En outre, en permettant de diriger le rayon de faisceau lumineux sur le point exact de l'objet à fondre, en le modifiant au besoin à l'aide d'un champ magnétique, il contribue à l'obtention d'une grande quantité de chaleur sans pertes d'énergie, d'où un excellent rendement. Enfin, on peut utiliser, pour le fonctionnement du tube, aussi bien le courant continu que l'alternatif, les ampoules agissant à la façon d'un redresseur en maintenant la cathode toujours au même pôle.

CHAPITRE V

FOURS A RÉSISTANCE

Dans ces fours, l'arc électrique n'intervient pas, mais la chaleur nécessaire aux réactions ou fusions est produite par le passage du courant à travers une résistance qui est ainsi portée à haute température à la façon du filament d'une lampe à incandescence. Il y a toutefois plusieurs méthodes pratiques permettant d'arriver à ce résultat et les fours à résistance actuellement en usage comprennent trois catégories :

a) Ceux dans lesquels la résistance est constituée par la *matière à traiter ou à fondre*, elle-même, et que pénètrent directement les électrodes ;

b) Ceux dans lesquels le *creuset de fusion* forme la résistance ;

c) Ceux dans lesquels il existe une *résistance intermédiaire* entre le creuset de fusion et les électrodes. Cette résistance est généralement constituée par des grains de charbon, de kryptol ou d'un métal réfractaire.

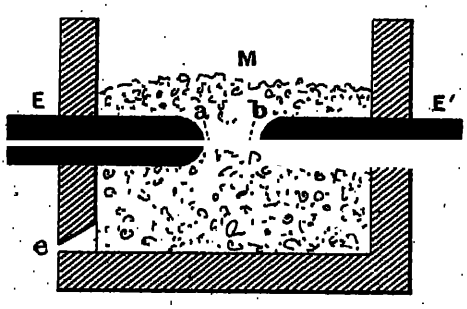


FIG. 41. — Four à résistance constituée par la matière en traitement.

Fours à résistance constituée par la matière en traitement. — Aux appareils du premier genre appartiennent les fours servant à la préparation de nombreux alliages

par union directe des éléments (cupro-aluminium, bronzes, laitons divers, etc.) ou de composés préparés par simple fusion électrothermique tels que l'alumine et l'émeri artificiel (adamite, corubis, alundum, etc.).

La figure 41 représente un de ces fours. Il comprend deux charbons E, E′ arrivant directement dans la matière à traiter M après avoir traversé les parois du four, et une résistance additionnelle en charbon ou métal *ab*. Cette dernière est portée au rouge blanc dès qu'on lance le courant dans l'appareil et permet ainsi de fondre autour d'elle une petite quantité de matière, même si cette dernière est insuffisamment conductrice à l'état solide. Cette résistance *ab* doit en général être remplacée après chaque opération, car, vu sa minceur, elle disparaît par volatilisation ou fusion dès que le four a atteint son régime normal. Une fois l'opération terminée, le produit obtenu est évacué à l'état liquide par le trou de coulée *e*.

La figure 43 représente un four du même genre, construit en briques réfractaires. La chambre de chauffe est limitée par ces dernières ; les deux câbles d'amenée du courant arrivent par deux côtés opposés du four, lequel mesure de 0m,75 à 1 mètre de longueur. Il est complètement démoli après chaque expérience, ce qui permet d'examiner plus facilement les produits de la réaction.

Cet appareil, très simple, peu coûteux et facile à établir, permet d'effectuer au laboratoire un grand nombre d'expériences relatives aux alliages et aux corps difficilement fusibles par les procédés ordinaires.

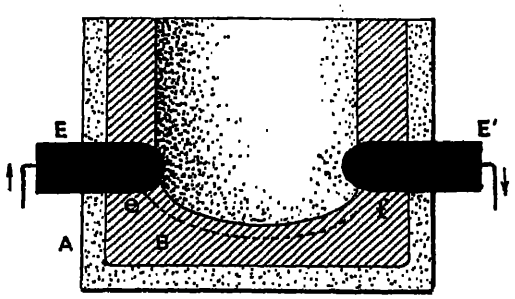


Fig. 42. — Four à substances pyroconductrices.

Dans le *four Steinmetz* (*fig.* 42), on utilise des substances dites « pyroconductrices «, c'est-à-dire qui deviennent semi-conductrices du courant sous l'influence de la chaleur. Il se compose d'une enceinte réfractaire et calorifuge A maintenant un bloc B constitué précisément par un mélange pyroconducteur, c'est-à-dire composé de magné-

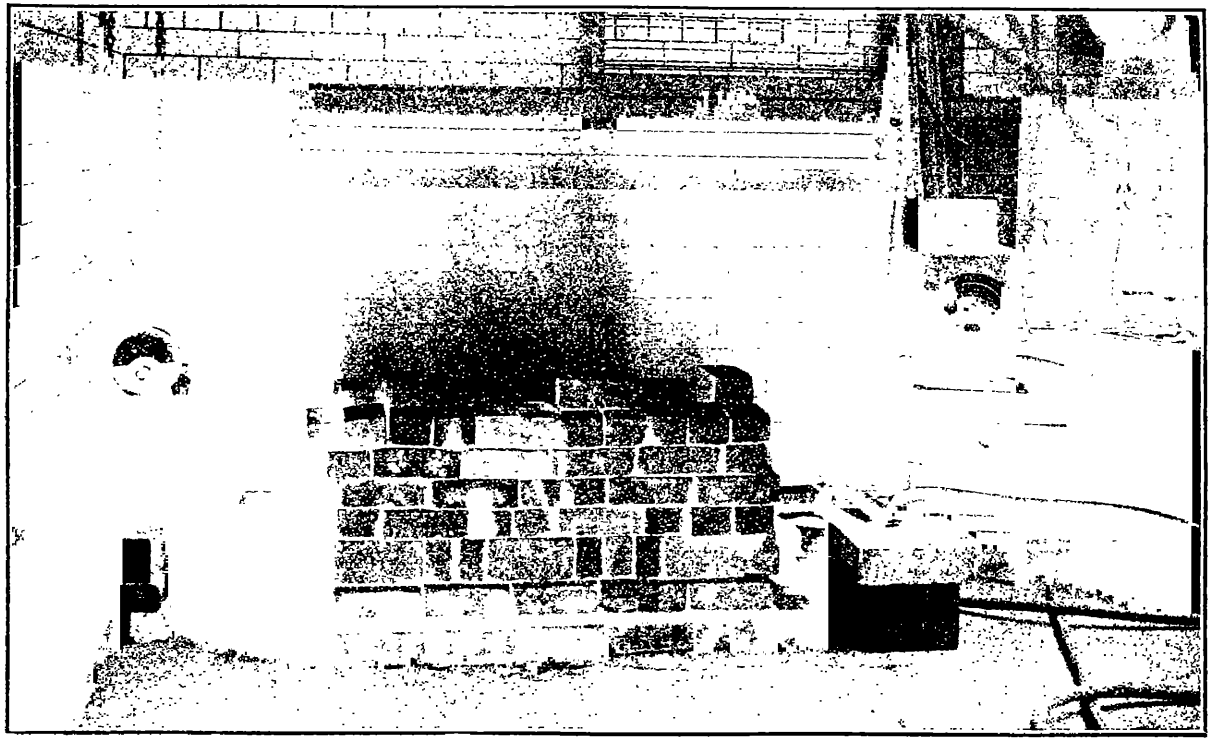


FIG. 43. — Four expérimental à résistance, en briques réfractaires. (Longueur 0m,75 à 1 mètre.)

sie, charbon, carborundum, etc., en proportions déterminées. La caractéristiques de l'appareil est un filament métallique *ef* reliant les électrodes E, E′ et renfermé dans la masse B. Dès que le courant passe dans ce filament, il l'échauffe, le porte au rouge et, en échauffant pareillement la matière qui l'entoure, rend peu à peu conductrice cette dernière. Si bien qu'en un temps très court, tout le creuset se trouve porté à haute température. C'est à ce moment qu'on introduit dans celui-ci les matières à fondre, l'opération s'effectuant très régulièrement et l'échelle des températures obtenues pouvant être assez étendue.

Pour le chauffage initial de la matière pyroconductrice formant creuset, on peut utiliser, au lieu d'un *fil* métallique, des *électrodes* composées d'un métal convenablement choisi. Dans le four Nathusius, le four est entièrement clos et comprend une chambre de chauffage dont les parois renferment des séries d'électrodes terminées, à l'intérieur du four, par des plaques de contact ; ces plaques sont placées symétriquement et noyées dans la substance formant creuset de manière à être à l'abri de l'air ; elles sont reliées extérieurement à une source de courant polyphasé de telle façon qu'il existe entre deux électrodes quelconques une différence de potentiel correspondant à leur distance et à la résistance de la matière pyroconductrice qui les sépare.

La plupart des oxydes peuvent servir de corps pyroconducteurs, mais beaucoup ne deviennent conducteurs qu'à des températures très élevées et variables suivant les substances considérées. Ces inconvénients peuvent cependant tourner à l'avantage de leur emploi simultané dans un même four. Pour cela on constitue la masse à échauffer par des couches de divers oxydes dont le plus réfractaire forme la partie inférieure et les parois du creuset de fusion. Au moyen d'une résistance quelconque, on chauffe l'oxyde le plus conducteur qui, par contact, échauffe son voisin et ainsi jusqu'à la couche la plus éloignée qui, vu son pouvoir réfractaire, peut atteindre une température très élevée.

Cette élévation progressive de température est, sous la forme opposée, comparable à la production du froid par l'obtention de degrés sans cesse plus bas par détentes progressives. Les oxydes d'étain, de zinc, de nickel, de cuivre et de fer, la silice, l'alumine

et la magnésie paraissent convenir très bien à cette application. A la température ordinaire, leur résistivité dépasse 50.000 ohms alors qu'elle tombe peu à peu à quelques milliers d'ohms à 400 ou 500° ; pour certains corps (oxyde d'étain et oxyde de nickel notamment), elle n'est plus que de 25 à 50 ohms à 1.100°. Les moins conducteurs à cette température sont l'alumine, l'oxyde de cuivre, la silice et la magnésie (500 à 600 ohms) ; cette dernière laisse passer un courant sensible vers 1.700°.

Fours à creusets formant résistance : essai des matériaux réfractaires. — Aux fours à creusets résistants se rattachent des types assez variés, en charbon ou en métal (platine, iridium, etc.). Le *four Tammann* (*fig.* 44 et 45), qui est du premier genre, comprend un tube de graphite A dont les extrémités supérieure et inférieure sont entourées de plaques évidées *e* également en gra-

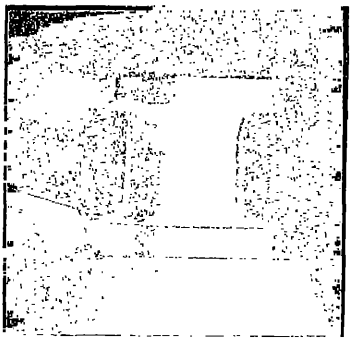


Fig. 44. — Four Tammann (vue extérieure).

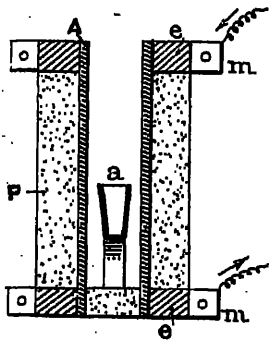


Fig. 45. — Four Tammann (coupe verticale).

phite ; ces dernières sont armées de bandes de fer *m* reliées électriquement au circuit extérieur. Le cylindre est en outre protégé par un bloc en terre réfractaire P. On peut introduire la matière à fondre directement dans le cylindre A ; mais, pour la plupart des essais, on se contente de placer dans l'appareil ainsi constitué un petit creuset *a* en métal réfractaire ou en charbon. Le chauffage est produit par le cylindre A porté au rouge blanc lors du passage du courant.

Ce four a été utilisé surtout jusqu'ici pour les essais relatifs aux alliages ; il a donné d'excellents résultats. Il nécessite une puissance de 250 à 300 ampères sous 10 volts environ. On règle très facilement la température à l'aide d'un rhéostat métallique.

Greenwood a utilisé un appareil du même genre que celui de Tammann, mais permettant d'opérer à volonté dans l'air ou dans des gaz quelconques ; de même, on peut faire varier la pression et, au besoin, effectuer la fusion des substances étudiées dans le vide. A son origine, le four Greenwood, tel qu'il est représenté par la figure 46,

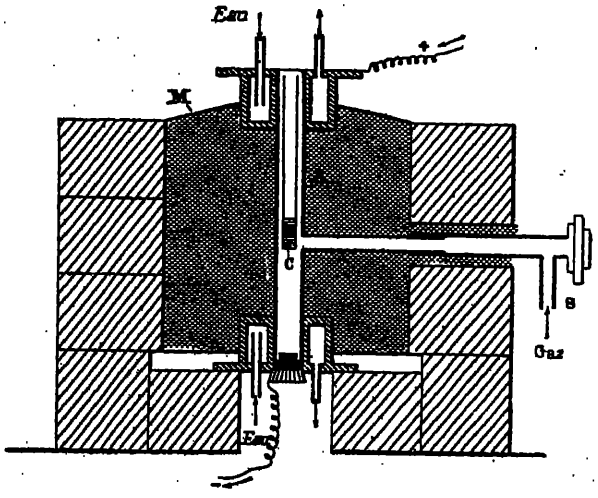


FIG. 46. — Four Greenwood pour opérations dans les gaz et à des pressions quelconques.

avait pour but la détermination du point d'ébullition des métaux, carburables ou non au contact du charbon et l'étude de l'influence de la pression sur l'ébullition des métaux non carburables (plomb, argent, bismuth, zinc, étain, etc.). Le four employé comprend un tube de charbon A placé au centre dans un bourrage de charbon de bois pulvérisé M. Le creuset de fusion C, bien suspendu dans le tube A, a 1 millimètre d'épaisseur et renferme du métal fondu sur 3 centimètres environ de hauteur ; la température est donnée à chaque instant par un pyromètre. Pour empêcher l'oxydation, on fait arriver en *s* un courant de gaz hydrogène ; ce dernier entraîne en même

temps les vapeurs métalliques pouvant troubler les observations pyrométriques. Le courant arrive par les extrémités supérieure et inférieure du tube A refroidies par l'eau.

Suivant les dimensions du tube, il faut, pour obtenir 2.500° rapidement, utiliser un courant de 700 à 900 ampères sous 8 à 10 volts. La différence de température entre les parois du creuset C et le métal fondu est si faible qu'elle rentre dans les erreurs d'expérience. Le creuset est en graphite, de sorte que l'ébullition est plus facile dans l'hydrogène que dans les autres gaz inertes, par suite de la rapide diffusion de ce gaz à travers les parois du creuset. Les résultats obtenus dans l'azote sont cependant en général plus hauts et se rapprochent sans doute davantage de la réalité.

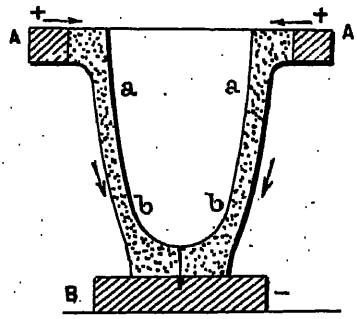


FIG. 47. — Creuset pour chauffage électrique.

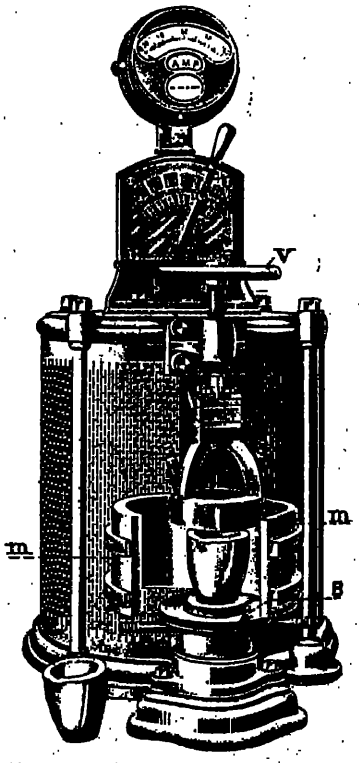


FIG. 48. — Four à transformateur.

Pour les métaux carburables (chrome, fer, manganèse, etc...), la difficulté consiste à trouver un creuset en matière convenable ; on arrive à de bons résultats à l'aide d'un creuset de graphite brasqué avec de la magnésie agglomérée au moyen d'une solution saturée de chlorure de magnésium. La brasque est attaquée par le charbon, au-dessus de 1.700°, mais pas assez vite pour empêcher les déterminations.

Quant à la pression, il est facile avec cet appareil, soit de la rendre très inférieure à la pression atmosphérique, soit au contraire de la faire varier entre 5 et 50 atmosphères par exemple.

Le *four Helberger* (*fig.* 47 et 48) présente cette double particularité d'utiliser, d'une part un transformateur faisant partie intégrante de l'appareil et, d'autre part, un creuset de forme spéciale (*fig.* 47), à parois minces *ab*. Le courant arrive à ce dernier par un anneau A que l'on peut serrer contre lui à l'aide d'un volant à main V (*fig.* 48) actionnant une vis. Le fond B, sur lequel repose le creuset, est en graphite comme ce dernier et communique électriquement avec le second pôle de la canalisation. Pour éviter les déperditions de chaleur, deux portes semi-circulaires *m* en matière réfractaire peuvent se fermer en entourant le creuset pendant le fonctionnement du four. Le courant suit le trajet indiqué par les flèches de la figure 47. On augmente les contacts électriques aux points de réunion du creuset et des électrodes A et B en interposant entre ces pièces des plaques de cuivre.

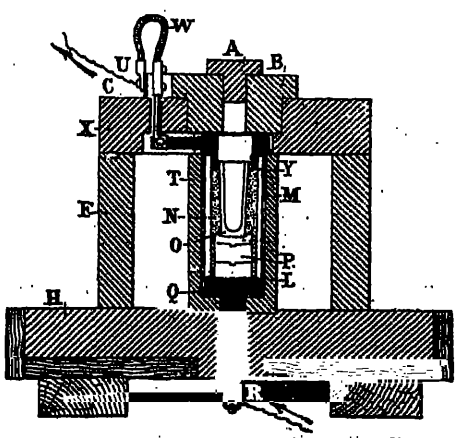


FIG. 49. — Four pour la fusion des métaux réfractaires.

Le four Calhane et Bard (*fig.* 49) sert principalement pour la *fusion des métaux réfractaires* et possède les caractéristiques suivantes : il est facile à démonter et à remonter et il permet d'obtenir et de maintenir des températures très élevées ; il utilise à cet effet du courant à 110 volts, sans transformation préalable. Il est, de plus, établi de façon à répartir également ce courant dans toute la masse du cylindre de carbone servant de résistance de chauffage et à réduire au minimum les pertes par radiation.

Le four est posé sur une dalle H, en ciment isolant, coulée dans un cadre en bois et percée au centre d'un trou pour le passage de

la tige R de l'électrode inférieure. Il est, d'autre part, entouré d'une caisse formée de dalles en ciment F, faciles à assembler et à démonter. Cette caisse est terminée vers le haut par un couvercle C percé d'un trou central fermé par un tampon B, lui-même muni d'un regard avec obturateur A. Le four proprement dit se compose d'un manchon L, en argile réfractaire, entouré d'un calorifuge granulé à l'amiante et à la magnésie, et contenant l'électrode inférieure Q. Sur celle-ci reposent : un tube en alundum M, la résistance en carbone N et trois rondelles en alundum superposées P, sur lesquelles se place le creuset O. Le tube de carbone N porte sur un rebord de l'électrode Q, qui assure une répartition uniforme du courant sur toute sa périphérie. La seconde électrode Y est connectée à la prise du courant U par un câble souple W. L'appareil permet, en modifiant la pression entre le cylindre de carbone N et les électrodes, de faire varier d'environ 20 % la chute de tension à travers ce cylindre ; lorsque le creuset O contient du platine fondu à la température de 1.780° C., celle des parties les plus chaudes du four et notamment des deux blocs supérieurs P serait très voisine de 2.000°. La répartition de la chaleur produite serait assez régulière pour éviter les ruptures fréquentes des creusets en alundum et on prévient celles du tube M en le faisant de deux moitiés juxtaposées suivant des génératrices.

Le four Griffiths (*fig.* 50 et 51) est spécialement destiné à l'*essai de ramollissement des matériaux réfractaires*. Il est en effet important, pour juger de la valeur pratique de ceux-ci, de pouvoir les essayer à haute température, au besoin jusqu'à leur point de ramollissement, afin de déterminer leur résistance à la compression avant que la température de fusion soit nettement atteinte.

Dans cet appareil, qui permet d'obtenir de 2.000 à 2.500° C., l'échantillon de matière réfractaire soumis à l'essai est placé en C. On lui a donné préalablement la forme d'un petit cylindre de 25 millim. de hauteur et 15 millim. de diamètre. Sur sa surface supérieure repose un piston qui lui transmet l'effort d'un compresseur D. On lit sur la réglette H la valeur de cet effort, qui est de l'ordre de 25 kilogrammes par centimètre carré. La base de support du cylindre-échantillon C est constituée par un cylindre de charbon et la chambre de chauffe par un tube de même substance qu'on

relie au circuit extérieur par un dispositif spécial (*fig.* 51) destiné à faciliter les connexions et le refroidissement des électrodes. C'est un tube de 5 centimètres de diamètre et de 18 centimètres de longueur. Une fente longitudinale *e* facilite les observations sur l'échantillon C au cours des essais. Les connexions sont emprisonnées dans une couche de métal versée à chaud dans l'espace annulaire qui sépare le tube-électrode en charbon des mâchoires métalliques. Un tube *a* sert de conduit à une circulation d'eau et de conducteur d'amenée au courant. On préserve de l'oxydation le tube de charbon par un courant d'azote.

L'enveloppe calorifuge du four est, soit une enveloppe de zircone *m*, soit un mélange de cet oxyde avec de la magnésie ou de l'amiante. Un cylindre en tôle A et deux disques en feutre d'amiante B protègent en outre l'appareil au point de vue mécanique et contre les déperditions de chaleur vers l'extérieur.

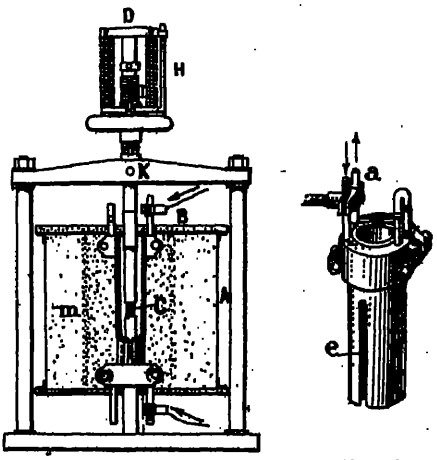


FIG. 50 et 51. — Four pour l'essai des matériaux réfractaires.

La température du cylindre-échantillon C se mesure à l'aide d'un pyromètre optique agissant à travers la fente *e*, l'élément de comparaison pouvant être fourni par le champ lumineux d'une lampe à incandescence. Les briques réfractaires essayées sous charges compressives ayant leur point de ramollissement voisin de 1.700°, il est facile de les essayer ainsi dans de très bonnes conditions.

Cet appareil peut du reste, pendant de courtes périodes, atteindre près de 3.000° C. Son régime normal de température est de 1.800 à 2.000° pour les essais prolongés.

Parmi les *fours à tube métallique*, il convient de signaler celui à tube d'iridium qui permet d'obtenir une température maximum de 2.400° C. On l'emploie surtout pour la détermination du *point de*

fusion des matières réfractaires. Le tube a de 10 à 20 centimètres de longueur, de 25 à 40 millimètres de diamètre et 0,4 millimètre d'épaisseur. Il sert directement de résistance et, dans ce but, à ses deux extrémités sont soudées des oreilles en platine elles-mêmes vissées à des prolongements en nickel ou argent qui servent de prises de courant ; il est protégé extérieurement par un revêtement réfractaire magnésien. Il fonctionne avec un courant de 6 à 7 volts et 1.500 ampères. Il permet d'atteindre 1.600° en une demi-minute avec 3 volts et 1.000 ampères.

Le four ainsi constitué est disposé de façon à pouvoir être amené dans une position soit verticale, soit horizontale, tout en étant susceptible d'une rotation autour de son axe ; on peut encore le déplacer d'environ 60 millimètres en direction verticale. Le courant dont on se sert pour le chauffer doit être d'une intensité considérable, en raison de la faible résistance du tube d'iridium ; pour réaliser une température maximum de 2.100° C., il convient, en effet, de choisir un courant de 1.200 ampères sous 5 volts. Afin de mesurer avec facilité et avec toute la précision voulue les températures élevées produites par le four et qui dépassent l'intervalle du pyromètre Le Chatelier, on se sert d'une pile thermo-électrique consistant en iridium pur, d'une part, et en un alliage d'iridium pur à 10 % de ruthénium, de l'autre. Cette pile a été calibrée par comparaison avec un élément étalon au platine-platine-rhodium, jusqu'à la température de 1.600° C., et en mesurant le point de fusion du platine pur (1.780° C.) au moyen de l'élément à l'iridium-ruthénium. Pour les températures dépassant cette dernière limite, on se sert d'une extrapolation.

La matière en expérience est disposée sur un plateau en iridium pur placé à l'intérieur du tube de cette même substance sur un support en chaux caustique. Les extrémités du tube sont fermées par des bouchons en matière réfractaire ; on observe le processus à travers un petit trou circulaire ménagé dans l'un de ceux-ci ; une ouverture analogue dans l'autre bouchon donne passage à la pile thermique. On emploie les matières soumises à l'essai sous la forme de petits cônes d'un poids de 0,5 à 2 grammes, disposés sur le plateau d'iridium de façon à se trouver approximativement dans l'axe du tube. Une lunette disposée à 1 mètre de distance du four

(un disque en verre rouge sombre étant inséré pour amortir la lumière aveuglante) sert à prendre les lectures.

On observe d'abord, à une température donnée, un commencement de ramollissement de la matière et, à une autre température différant de la première de 5 à 15° suivant la nature de la matière, la fusion complète de celle-ci. En dehors de la valeur absolue du point de fusion, l'intervalle de température séparant ces deux points est très important pour apprécier l'utilité industrielle d'un produit donné. Afin de déterminer cet intervalle avec toute la précision voulue, Heraeus a imaginé une méthode d'enregistrement, la poussée exercée par un levier à contre-poids sur un cube de la matière en expérience étant inscrite en fonction de la température.

On obtient ainsi des courbes d'une inclinaison plus ou moins rapide ; les matières à courbe rapidement ascendante sont fort résistantes aux basses températures, tandis que leur résistance décroît rapidement à mesure que la température s'élève pour atteindre une limite inférieure.

Le seul inconvénient de ce four est son prix de revient très élevé dû à l'emploi de l'iridium (150 gr.), du platine (200 gr.) et de l'argent (200 gr.), trois métaux très coûteux.

On doit aussi au savant anglais Slade un four en tube de platine construit en vue d'étudier, à des températures s'élevant jusqu'à 1.500° C. et dans le vide, certains cas d'équilibre hétérogène dans lesquels celui-ci se trouve déterminé par la pression du système. La rupture de cet équilibre a pour conséquence, par exemple, la dissociation d'oxydes, d'azotites et de carbonates et la réduction d'oxydes par le charbon. Le four dont il s'agit consiste en un tube de platine de 17 centimètres de longueur et 20 centimètres de diamètre, avec une paroi épaisse de 1 millimètre. Les extrémités du tube s'adaptent dans des bornes en laiton pourvues d'une réfrigération hydraulique. Ce même tube est chauffé par un courant de 200 à 500 ampères qui le traverse. Une de ses extrémités est soudée à un tube capillaire en argent qui se rend à la pompe à vide et à un manomètre ; l'autre extrémité s'adapte à un obturateur en argent au travers duquel passe le couple thermique. Le four est installé dans une enveloppe au sein de laquelle on peut régler la pression, de manière que celle-ci soit à peu près identique à l'inté-

rieur et en dehors du tube. Cette précaution s'impose, car le platine s'amollit à des températures élevées. Ce four fonctionne de manière satisfaisante jusqu'à 1.500° C. et conserve le vide.

Mentionnons également le *four à feuilles de platine* recouvrant un cylindre réfractaire. Les feuilles de métal sont entrelacées, c'est-à-dire se recouvrent l'une l'autre en formant une surface continue, un véritable cylindre métallique recouvrant la matière réfractaire qui sert en réalité de support au platine et de chambre de chauffe. On obtient 1.300° en trente minutes avec un courant de 2,5 ampères et 220 volts.

Fours à résistance intermédiaire. — Les fours à résistance intermédiaire sont les plus nombreux. Ils présentent du reste l'avantage de permettre une élévation graduelle et régulière de la température, d'atteindre un degré de chaleur élevé et de maintenir celui-ci constant pendant une durée d'opération très longue. Ils sont en outre d'une construction facile, ne nécessitent généralement que des matériaux peu coûteux et commodes à se procurer.

Nous avons vu plus haut que les corps les plus employés comme résistance sont principalement le carbone (graphite), le carborundum, les métaux réfractaires. Ces derniers, en particulier le chrome, le tungstène et le molybdène, peuvent donner de bons résultats, soit à l'état de grains agglomérés ou libres, soit à l'état de poudre. Mais, pour que le courant traverse la masse ainsi constituée, il est nécessaire qu'elle soit suffisamment comprimée ; elle obéit alors à la loi d'Ohm comme un conducteur ordinaire. Les points de fusion du chrome (2.000°), du molybdène (2.500°) et du tungstène (2.900°) permettent de réaliser un chauffage économique intensif jusqu'à des températures que ne permet pas l'emploi du platine ; comme, de plus, ils sont à peu près inaltérables, ils peuvent constituer des fours de longue durée.

M. Dony-Henault a appliqué ces données à la construction de fours à résistance en chrome métallique granulaire par l'emploi de plusieurs dispositifs spécialement destinés aux recherches de laboratoire.

Pour le *chauffage des creusets*, on utilise l'appareil représenté

par la figure 52. Dans un bloc réfractaire en magnésie, on creuse une cavité légèrement plus grande que le creuset *c*. On y place celui-ci en ménageant un espace régulier de 3 à 4 millimètres entre les deux parois, puis on comble le vide à l'aide de poussière de chrome. On place finalement à la surface de ce métal laissée libre à la partie supérieure un anneau de charbon et l'on enfonce dans la poussière de chrome, aux extrémités opposées d'un diamètre du creuset, deux balais de graphite *a* et *b*. Un creuset de 100 centimètres cubes de capacité peut être chauffé ainsi très efficacement avec 15 ampères jusqu'au point de ramollissement du verre de quartz. La tension aux bornes du courant est de 8 à 10 volts, mais la conduction ne s'établit pas si l'on ne dispose pas d'un excès de tension.

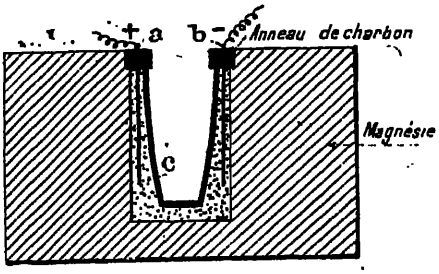


FIG. 52. — Four à résistance de chrome (chauffage d'un creuset).

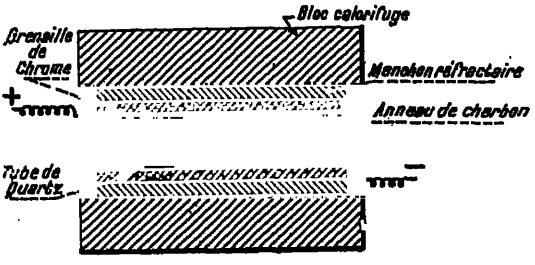


FIG. 53. — Four à résistance de chrome pour tube.

Pour la confection d'un *four à tube* d'après ces mêmes principes, on verse (*fig.* 53) entre un manchon réfractaire pourvu d'une cavité cylindrique et un tube de quartz opalin ou encore entre deux tubes de quartz concentriques de diamètres différents, une couche de grenaille de chrome qu'on emprisonne entre deux anneaux de charbon servant d'électrodes.

Un four de $0^m,50$ de longueur et de 30 millimètres de diamètre peut ainsi être chauffé au rouge blanc avec une force électromotrice de 15 à 50 volts aux bornes du tube.

On peut aussi construire un four tubulaire à espace annulaire (*fig.* 54) en plaçant dans l'axe du tube ou d'une cavité cylindrique

un tube de quartz assez étroit et rempli de grenaille de chrome insérée entre deux charbons servant d'électrodes. Les pertes calorifiques sont encore plus faibles que dans l'appareil précédent, la chaleur centrale étant transmise à peu près intégralement à l'espace périphérique *e*. Le tube chauffant est soutenu par deux bouchons ou anneaux réfractaires au centre desquels se trouvent les charbons-électrodes amenant le courant.

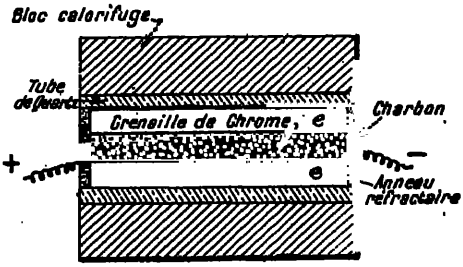


FIG. 54. — Four tubulaire à espace annulaire.

Ce dernier dispositif paraît spécialement convenir à l'étude des réactions entre gaz à haute température. Il permet d'éviter l'action directe ou indirecte de l'arc lui-même sur les gaz en mélange et qui n'est peut-être pas étrangère à la formation inattendue de certains composés.

Dans un modèle de *four Borchers* (*fig.* 55 et 56), les électrodes E, E′ sont directement en contact avec le creuset C, mais communiquent en outre avec de la grenaille métallique ou de la poudre de charbon M sur laquelle repose le creuset. Celui-ci est donc chauffé sur toute sa surface extérieure, ce qui permet d'effectuer des fusions très rapides.

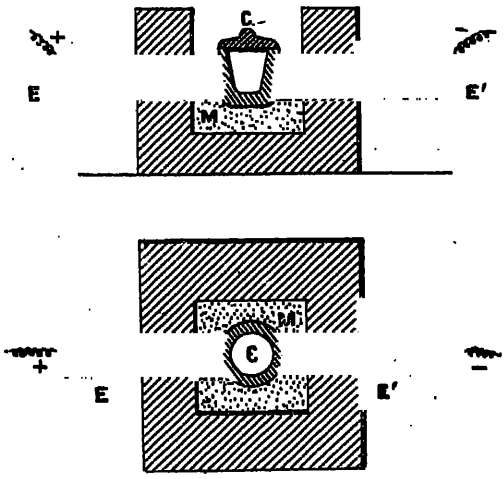


FIG. 55 et 56. — Four à chauffage mixte par électrodes et grenaille (coupes verticale et horizontale).

Dans le *four Bronn*, les électrodes, au nombre de quatre (deux par pôles), pénètrent dans la masse granulaire M (*fig.* 57), celle-ci étant séparée du creuset C par une paroi réfractaire P. On peut

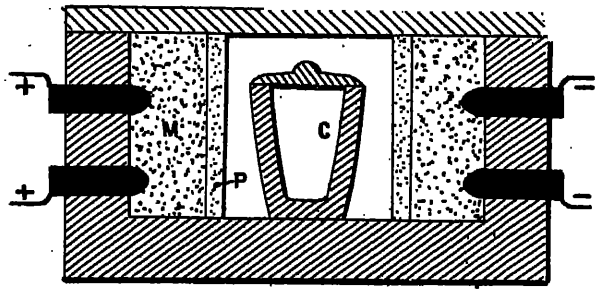


Fig. 57. — Four à chauffage mixte.

ainsi mettre et retirer de l'appareil le creuset sans interrompre le courant. Dans le dispositif représenté par la figure 58, la masse

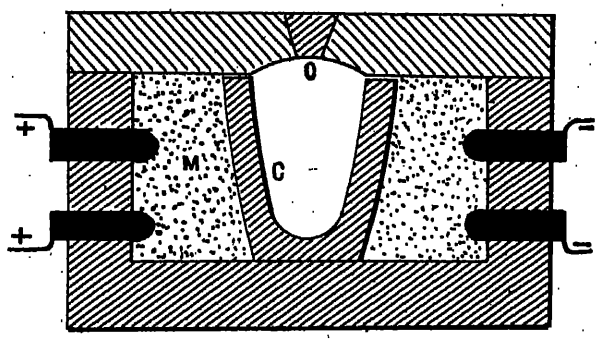


Fig. 58. — Four à chauffage mixte.

granulaire M est en contact direct avec le creuset C et la matière à fondre est introduite à l'aide d'une ouverture *o* pratiquée dans le couvercle ; celui-ci ferme à la fois le four et le creuset de fusion.

Dans le *four Greenwood et Hutton*, la résistance de chauffe est formée de baguettes de graphite disposées en série (*fig.* 59 à 61). Seize baguettes *t* (*fig.* 60), placées verticalement, sont réunies deux à deux alternativement par le haut et par le bas, au moyen de blocs de

même matière *s*. Le courant est amené à deux de ces blocs diamétralement opposés par des barres, également en graphite, dont les deux extrémités reliées aux conducteurs d'amenée du courant sont scellées dans des contacts à circulation d'eau.

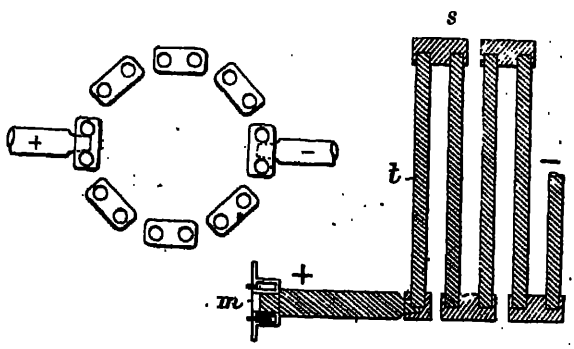


FIG. 59 et 60. — Four Greenvood et Hutton (détails de fabrication de la résistance de graphite).

Les baguettes *t* sont protégées contre l'action oxydante de l'air par un garnissage formé de carborundum pulvérisé et de silicate de soude [1]. La figure 61 représente la coupe verticale du four. Les ba-

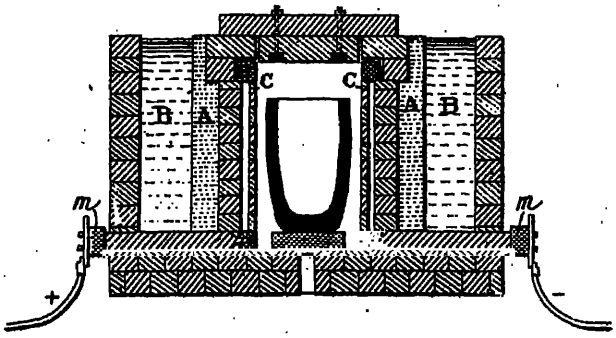


FIG. 61. — Coupe verticale du four Greenvood et Hutton. (*m*, blocs d'arrivée et de sortie du courant)..

guettes *t* du résistor sont, comme il a été dit, réunies deux par deux par les blocs *s*. L'enveloppe isolante comprend la couche de carbo-

(1) La terre d'infusoires (randanite, kieselguhr, etc.) convient mal pour cet usage, car elle se contracte contre les baguettes de graphite et engendre un mauvais rendement du four.

rundum pulvérisé A entourée de terre d'infusoires B, le tout contenu dans une enceinte de briques. Le creuset est en graphite naturel ou artificiel.

Ce four, qui est surtout employé pour la fusion des métaux et alliages, peut absorber jusqu'à 18,3 kilowatts (300 ampères sous 61 volts). Sa consommation moyenne est de 8,5 kilowatts-heure par 10 kilogrammes de métal ou alliage fondu.

Signalons enfin le *four Girod*, appliqué industriellement à la fabrication des ferro-alliages et notamment du ferro-vanadium par union directe des éléments. Il se compose (*fig.* 62 et 63) d'un creuset C en charbon, métal ou produit réfractaire quelconque, entouré d'une masse granulaire de charbon

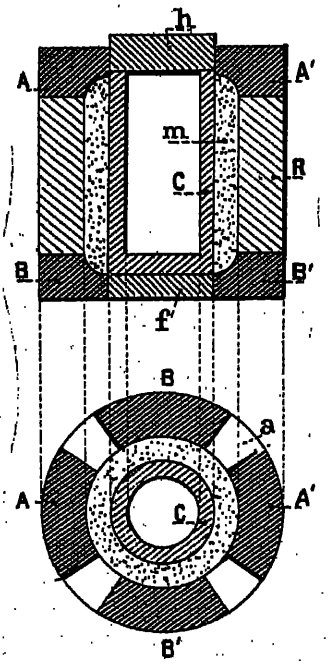


FIG. 62 et 63. — Four Girod pour alliages (coupes verticale et horizontale).

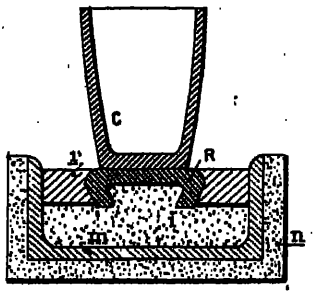


FIG. 64. — Creuset électrique Girod.

m qui constitue la résistance de chauffe de l'appareil. Le courant lui arrive par deux paires de charbons graphitiques A, A′ et B, B′ réunis deux par deux aux pôles du circuit extérieur. Ces charbons sont naturellement séparés par une matière isolante et calorifuge *a* et, d'autre part, le four est protégé lui-même contre les déperditions de chaleur par un revêtement R. Le creuset repose sur une base en magnésie *f* et est recouvert par un couvercle *h* venant le fermer exactement. D'après

les expériences déjà effectuées, un four ainsi constitué peut servir pour une centaine d'opérations.

Il est du reste préférable, pour assurer sa conservation, de protéger toute sa surface extérieure par un revêtement métallique ; pour faciliter les coulées, on peut le rendre mobile sur un axe horizontal à l'aide de deux tourillons qui permettent de le faire basculer au moment de l'évacuation des matières fondues.

Un autre dispositif du four Girod (*fig.* 64) comprend une plaque de charbon annulaire R formée en réalité de deux portions semi-circulaires reliées chacune à l'un des pôles de la machine génératrice. Une résistance auxiliaire *r* entoure la plaque, et l'ensemble est isolé à l'aide d'une matière quelconque *i*. On évite les déperditions calorifiques au moyen des revêtements réfractaires *m* et *n* constitués par de l'amiante ou de la magnésie.

Le creuset de fusion C repose directement sur le charbon R dont la partie chauffante est amincie en vue de concentrer au-dessous du creuset le maximum de chaleur. On peut ainsi faire varier la température entre 500° et 2.000°, la partie inférieure du creuset étant seule chauffée directement.

CHAPITRE VI

FOURS A BAINS DE SELS FONDUS

Dans ces appareils, utilisés surtout pour la trempe, la chaleur est produite par le passage du courant à travers une masse de sels fondus. Comme la conductibilité électrique de ces substances est à peu près nulle à froid, on détermine leur fusion au moyen d'une électrode de secours E'' (*fig.* 65), en l'appliquant contre une des électrodes fixes E, et en la déplaçant jusqu'à son contact contre l'autre électrode E'. On forme ainsi une rigole de sel fondu conductrice du courant ; la fusion, une fois amorcée, se propage de proche en proche.

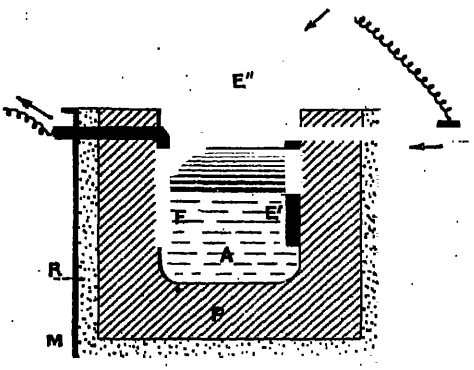


FIG. 65. — Four à bain de sels fondus (coupe schématique).

On comprend que le réglage de ces fours soit très précis par l'emploi de résistances placées dans le circuit. On peut du reste utiliser des sels ou des mélanges de sels variés ; mais, pour supprimer les effets d'électrolyse et obtenir la basse tension nécessaire, ils doivent fonctionner avec le courant alternatif et nécessitent l'emploi de transformateurs. Le four P (*fig.* 65) est en matière réfractaire ; il est entouré d'amiante R et d'un protecteur en fer M. Les électrodes E, E' sont en fer. La figure 66 donne une vue d'ensemble de l'appareil.

Composition des bains. — La composition des bains varie suivant la nature du travail à effectuer et la température à obtenir, comme le montre le tableau ci-dessous :

NATURE DU TRAVAIL A EFFECTUER	TEMPÉRATURE	SELS A EMPLOYER
Recuire l'acier.....	200 à 580°	Azotates de soude et de potasse mélangés.
Désécrouir les alliages de cuivre.	650 à 990°	Chlorure de sodium ou chlorure de sodium et chlorure de potassium mélangés.
Tremper les aciers au carbone..	750 à 1.100°	Chlorures de potassium et de baryum mélangés.
Tremper les aciers complexes..	1.050 à 1.350°	Chlorure de baryum.
	1.500 à 1.600°	Fluorure de calcium ou de magnésium.

Les nitrates de soude et de potasse peuvent attaquer le fer et se transformer graduellement en nitrites. Les chlorures sont sans action, excepté à la surface en contact avec l'air. Le sel le plus usité est le chlorure de baryum.

Voici quelques chiffres de consommation, en kilowatts, pour des fours de dimensions différentes et de forme à peu près cubique :

LONGUEUR DE COTÉ	KILOWATTS CONSOMMÉS A :			
	750°	850°	1.150°	1.300°
120mm	2,5	3	5,5	7,5
150	3,5	4,5	9	12
200	7,5	8,5	16	22
300	17,5	20	36	48

A 1.300°, les intensités de courant sont respectivement de 700, 900, 1.700 et 2.800 ampères pour les dimensions indiquées.

Emploi. — Dans la pratique, les objets sont, soit directement introduits dans le bain, soit préalablement chauffés dans un four à

coke. Quand ils sont plongés dans le bain, la température s'abaisse d'abord considérablement, le niveau du sel fondu s'élève, sa résistance diminue ; par suite, la température et l'intensité du courant se règlent peu à peu jusqu'à une certaine limite. Le contrôle de la température s'effectue simplement à l'aide d'un ampèremètre.

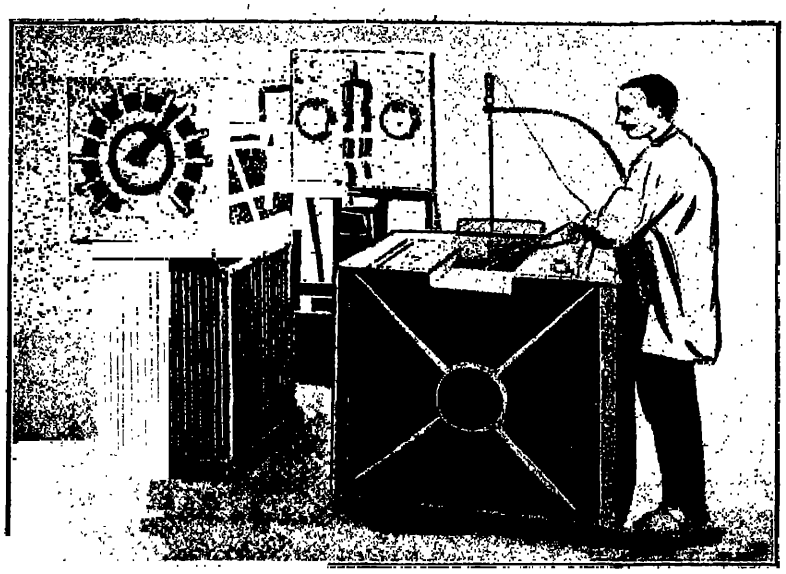


FIG. 66. — Four à bain de sels fondus et appareils de manœuvre (vue d'ensemble).

Une fois l'opération terminée, les pièces traitées sont plongées dans l'eau ou dans d'autres liquides, ou nettoyées pour enlever la couche de sel adhérente. Grâce à la disposition de l'appareil, qui permet des contrôles constants de tous les facteurs agissants, on peut effectuer avec ce four des recherches très précises de métallographie.

CHAPITRE VII

FOURS A INDUCTION

Principe théorique. — Ces appareils sont encore peu employés dans les laboratoires, bien que dans l'industrie leurs applications se développent chaque jour, principalement dans la fabrication de l'acier. On sait en quoi ils consistent ; ils sont formés, en principe, d'un transformateur dont le primaire est constitué par le circuit d'alimentation et le secondaire par le métal à fondre ou le mélange à traiter. Ce dispositif a l'avantage de permettre au courant secondaire de circuler au sein même de la masse à chauffer. Le creuset est formé par un canal en terre réfractaire entièrement fermé sur lui-même ; cette sorte d'anneau est traversé, au centre généralement, par l'électro-aimant du transformateur.

On réalise ainsi des appareils d'un très grand rendement. Malheureusement, l'encombrement du four à induction, même de faible capacité, est toujours important, par suite du volume occupé par le circuit primaire. Son principal avantage est de reproduire une élévation régulière de température, sans à-coups et sans introduction de substances étrangères ou impuretés quelconques au sein des matières fondues. Il n'existe en effet aucune électrode ni aucun foyer extérieur pouvant souiller le bain au cours de la fusion ou de la réduction. On est donc à peu près certain d'obtenir les résultats prévus, et cela présente un grand intérêt dans les recherches concernant bon nombre d'alliages et de produits sidérurgiques.

Four Dolter. — Le *four à induction de Dôller* (*fig.* 67) sert à porter à une température de 1.000° à 1.100° un moufle en nickel

présentant les dimensions suivantes : 190 × 70 × 60 millimètres. Au régime normal de 30 ampères sous 110 volts, il ne faut que deux ou trois minutes pour atteindre la température maximum qu'on peut ensuite maintenir constante aussi longtemps qu'on le désire.

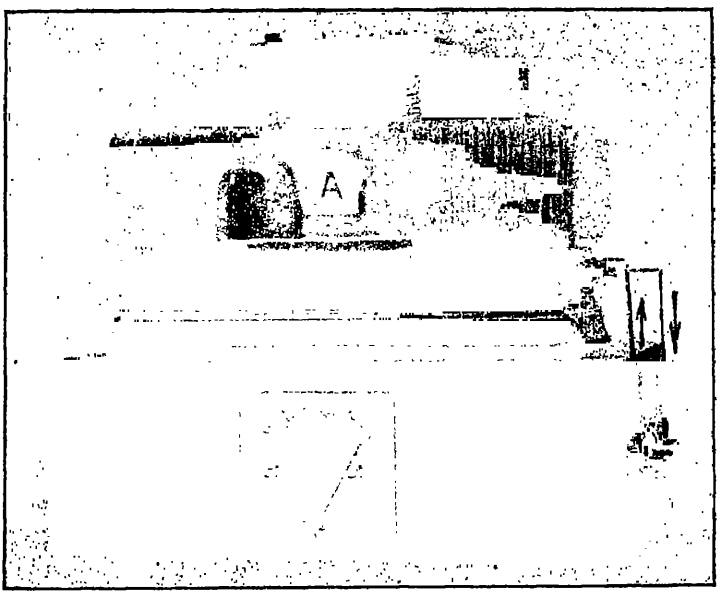


Fig. 67. — Four à induction de Dolter.

Ce four se compose essentiellement de bobines constituant le primaire d'une sorte de transformateur. Les bobines primaires sont entourées d'un circuit secondaire en cuivre formant pont ; c'est entre les parties médianes de ce secondaire que se trouve placé le moufle en nickel A. Un dispositif spécial permet d'utiliser tout ou partie du primaire, afin de régler à volonté le degré de température qu'il est nécessaire d'obtenir.

Four Schuen (*fig.* 68 et 69). — Il permet d'obtenir une température comprise entre 700° C. et 800° C. Son circuit magnétique comprend comme noyau un tube en fer forgé A de 8,4 centimètres carrés de section transversale et comme branches un

cadre double en fil de fer dont la section, de chaque côté, est de 11,7 centimètres carrés. L'enroulement primaire *m* comprend 10 bobines de chacune 16 spires ; ces bobines sont groupées en tension. L'enroulement secondaire *n* est formé par le tube de fer du noyau magnétique. C'est dans ce dernier que se place le tube ou le creuset destinés à renfermer les substances à chauffer, à fondre ou à réduire.

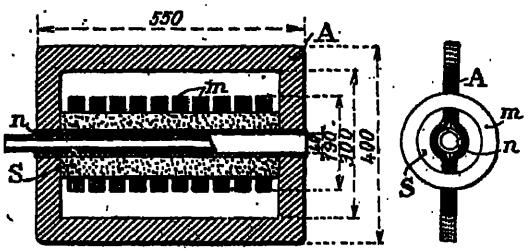


FIG. 68 et 69. — Four à induction Schuen (coupes horizontale et verticale).

La caractéristisque de l'appareil est donc l'emploi simultané du fer comme noyau magnétique et comme enroulement. On évite ainsi la dispersion. Mais on sait que le magnétisme dépend de la température ; pour une faible force magnétisante, la perméabilité monte d'abord lentement, puis rapidement jusqu'à 750° pour baisser ensuite très rapidement ; quand la force magnétisante s'élève, le phénomène reste le même, mais la chute est moins rapide. Si donc la température de l'appareil atteint 750° C., la perméabilité tombe brusquement à 0° et le courant doit devenir nul dans le secondaire. En pratique ceci n'arrive pas, car le flux magnétique reste constant sur la branche descendante de la perméabilité.

Les bobines sont fabriquées avec du fil de cuivre de 3,5 millimètres de diamètre entouré d'une corde d'amiante. On l'enroule sur un calibre et, après avoir enlevé ce dernier, on entoure encore le tout à l'aide de corde d'amiante. L'isolement calorifique S consiste en deux couches d'amiante entre lesquelles on comprime de la laine de scorie.

Four Colby. — Il se rapproche, par sa construction, des fours industriels employés dans la métallurgie de l'acier et comprend un creuset annulaire A (*fig.* 70 et 71) placé dans une enveloppe en carton d'amiante et rempli de magnésie. Le circuit magnétique comprend quatre éléments, *pq*, *v*, *v'* et *mn* ; il est fermé par les pièces *m* et *n*, aisément démontables et la pièce N formant le noyau magnétique. Ce dernier pénètre dans l'axe de la bobine primaire B constituée par un tube de cuivre à circulation d'eau : ses spires sont séparées et isolées les unes des autres par une matière réfractaire, et du noyau ma-

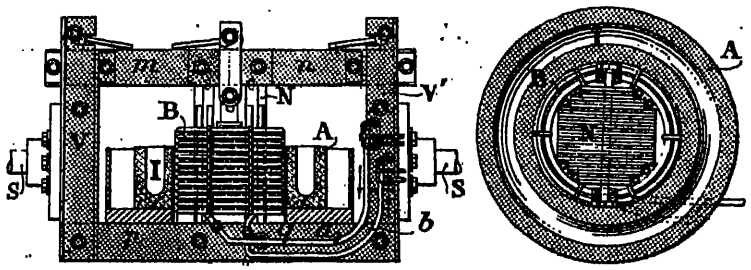


FIG. 70 et 71. — Four à induction Colby (coupes verticale et horizontale).

gnétique N par des tubes en porcelaine. Le secondaire est formé par le métal ou l'alliage renfermé dans le creuset circulaire A. Le courant arrive à l'appareil par les deux câbles *a* et *b* reliés au circuit extérieur E. Le four est monté sur deux tourillons qui permettent de le faire basculer.

Certains fours Colby destinés aux essais industriels fonctionnent sous des puissances variables ; dans un modèle, le primaire comprend 28 spires de cuivre de 16 millimètres de diamètre extérieur et $9^{mm},50$ de diamètre intérieur ; cela correspond, pour le bain, à 15 ampères et 8,6 volts environ. Pour une capacité de 85 kilogrammes dont 40 sont coulés à chaque opération, celle-ci dure une heure dont une demi-heure pour la fusion et une demi-heure pour la mise au point. Il faut 60 à 85 kilowatts-heure par 100 kilogrammes de métal fondu.

Four à haute fréquence Northrup. — Dans cet appareil, le chauffage est obtenu à l'aide de courants oscillants à haute fré-

quence qu'on envoie dans un bobinage entourant le creuset de fusion. L'induction est ainsi réalisée sans emploi de fer.

On sait que le procédé le plus simple d'obtention des courants

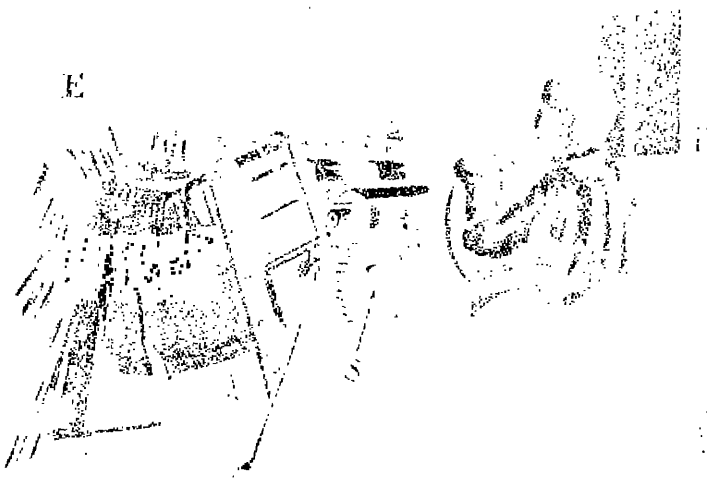


FIG. 72. — Four à induction Colby
(vue extérieure de l'appareil en fonctionnement).

oscillants consiste à utiliser ceux produits par la décharge de condensateurs. Ces courants passent à travers une bobine inductrice d'environ 50 tours et qui enveloppe le creuset tout en en étant suffisamment éloignée pour permettre son isolement électrique et calorifique. En faisant usage d'un bobinage genre Tesla dans

lequel le voltage est abaissé et l'intensité du courant élevée, on peut appliquer le calcul suivant :

Si un condensateur de capacité C est chargé à V volts, l'énergie potentielle accumulée dans le diélectrique a pour valeur :

$$\frac{1}{2} CV^2.$$

Lors de la décharge du condensateur, cette énergie se transforme : elle devient cinétique et peut prendre la forme, soit de radiations électriques, soit d'énergie thermique. L'appareil utilisant cette dernière forme d'énergie se compose de réactances réglables, de transformateurs à haute tension, d'un dispositif de réglage fonctionnant sans pièces mobiles, de deux groupes de condensateurs, d'un bobinage inducteur pour le four et d'une source de courant triphasé à 60 périodes et 220 volts.

Les expériences effectuées à l'aide de cet appareil ont montré que le rendement conserve une valeur à peu près uniforme, qu'il fonctionne à pleine charge ou à charge réduite. En 35 minutes, il permet de fondre environ 20 kilogrammes de laiton pris à la température ordinaire, avec une dépense moyenne de 18 kilowatts.

Certains modèles du four Northrup fonctionnent dans le vide et peuvent recevoir un creuset en graphite de 18 à 20 centimètres de hauteur et 13 à 15 centimètres de diamètre. On peut y porter en moins de 50 minutes son contenu (étain, verre, etc.), à 1.600° environ, tout en maintenant un vide de moins de 1 centimètre de mercure. Certains verres deviennent mousseux quand ils sont chauffés dans ces conditions.

Le rapport entre la quantité de chaleur développée dans le creuset et la puissance (kilowatts-heure) amenée aux bornes de l'interrupteur (rendement thermique) est de 60 % environ pour le modèle de 20 kilowatts. On peut du reste obtenir de meilleurs rendements avec les fours de plus grande puissance. Le premier four d'essai fonctionnait avec, aux bornes du condensateur, une tension comprise entre 5.400 et 7.200 volts. Une fréquence de 12.500 à 25.400 périodes par seconde a donné des résultats très satisfaisants.

Le creuset est entouré d'un cylindre de quartz en vue de l'isolement électrique de l'appareil ; de plus, tout le four est protégé du

voltage élevé qui l'alimente à l'aide d'une cage métallique. couche de silex d'environ 1 centimètre d'épaisseur autour du c set suffit pour maintenir le bobinage inducteur au-dessous rouge quand le contenu du creuset est au-dessus de 1.400° C. viron.

On emploie surtout le four Northrup pour les essais relatifs fusion des verres, des alliages à point de fusion élevé, des laitor l'or et de l'argent, etc. Les tournures peuvent y être fondues dement, même quand elles sont renfermées dans un creuset re taire fait d'une substance non conductrice : il se forme alors les particules de métal une infinité de petits arcs. En fondant le four à vide du fer électrolytique contenu dans un creuse magnésie, on élimine complètement le carbone.

865

TABLE DES MATIÈRES

Pages.

AVANT-PROPOS v

CHAPITRE PREMIER

MATÉRIAUX DES FOURS

Produits réfractaires et isolants : chaux, carbonate de chaux, charbon, magnésie, azoture de bore, chromite, siloxicon, quartz fondu 1
Creusets 3
Résistances de chauffe 6

CHAPITRE II

FOURS A LAMES OU FILS RÉSISTANTS

Fils de platine et de nickel 8
Fils en alliage nickel-chrome 8
Fils et tubes d'iridium 10
Lames de charbon 10
Mailles métalliques 11
Lames de platine 12
Applications 17
Fours pour chauffage à basse température 21
Fours à tube à température uniforme 22

CHAPITRE III

FOURS A ARC

Fours à arc horizontal 25
Fours à arc vertical 31
Fours pour réactions entre gaz 33
Fours pour expériences à hautes pressions ou dans le vide 35
Fours à arcs diphasés et triphasés 37
Fours à arc au mercure 40

CHAPITRE IV

FOURS A ARC ET RÉSISTANCE

Fours à sole conductrice 44
Fours à pisés semi-conducteurs 50
Fours à électrodes métalliques 55
Fours à effluves 56

CHAPITRE V

FOURS A RÉSISTANCE

Four à résistance constituée par la matière en traitement 58
Fours à creusets formant résistance. — Essai des matériaux réfractaires.... 62
Fours à résistance intermédiaire 70

CHAPITRE VI

FOURS A BAINS DE SELS FONDUS

Composition des bains 78
Emploi 78

CHAPITRE VII

FOURS A INDUCTION

Principe théorique 80
Four Dolter 80
Four Schuen 81
Four Colby 83
Four à haute fréquence Northrup 83

INDIAN INSTITUTE OF SCIENCE
LIBRARY
BANGALORE

TOURS. — IMP. DESLIS FRÈRES, 6, RUE GAMBETTA.

44
50
55
56

58
62
70

78
78

80
80
81
83
83